

Leevi Korhonen

**TEOLLISTEN LEIKKEIDEN POIMIMISEEN
SOVELTUVAN ROBOTIN TARTTUJAN
SUUNNITTELEMINEN**

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Jyrki Latokartano
Niko Siltala
Huhtikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Leevi Korhonen: Teollisten leikkeiden poimimiseen soveltuvan robotin tarttujan suunnitteleminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2025

Diplomityön tavoitteena oli kehittää robottiin liitettävä tarttuja, joka soveltuu erilaisten teollisten leikkeiden automatisoituun poimintaan. Teolliset leikkeet ovat levymäisiä kappaleita, joiden muodot, materiaalit ja mitat vaihtelevat huomattavasti. Nykyiset tarttujaratkaisut eivät tarjoa riittävästi joustavuutta käsitellä erilaisia leikkeiden variaatioita ilman mekaanisia muutoksia tai useita eri tarttujia, mikä rajoittaa erityisesti pienten ja keskisuurten yritysten mahdollisuuksia automatisoida tuotantoaan kustannustehokkaasti.

Työn teoriaosuudessa perehdyttiin teollisten leikkeiden ominaisuuksiin, erilaisiin tartuntaperiaatteisiin sekä muihin kehitettyihin tarttujiin, joiden toiminnasta haettiin tietoa toimivista lähistymistavoista ongelmaan. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi työn tueksi toteutettiin puolistrukturoitu haastattelu, jonka tavoitteena oli selvittää teollisuuden käytännön näkemyksiä ja haasteita leikekappaleiden käsittelyssä. Näiden tietojen perusteella määriteltiin suunnitteluvaatimukset kehitettävälle tarttujalle.

Käytännön osuudessa kehitettiin tarttujan rakenne hyödyntäen konstruktivista tutkimusmenetelmää. Suunnittelua edelsivät alustavat testit, joissa kartoitettiin imukuppiratkaisujen toimivuutta eri kokoisilla ja muotoisilla leikekappaleilla. Testien tuloksien perusteella suunniteltiin varsinainen tarttuja, ja suunnittelun pohjalta rakennettiin tarttujan prototyyppi. Tarttujan rakenne mahdollistaa sen muodon ja tartuntapisteiden säätämisen, minkä ansiosta se soveltuu erilaisten levymäisten kappaleiden käsittelyyn ilman manuaalista säätöä.

Tarttujan toimivuutta arvioitiin testeillä, joissa poimittiin erilaisia leikkeitä. Prototyyppi osoittautui toimivaksi ja soveltuvaksi monimuotoisten leikkeiden poimintaan. Tarttujan käyttöliittymä ja ohjaus toteutettiin siten, että se voidaan integroida suoraan Universal Robots UR5 -teollisuusrobottiin hyödyntäen tehtyä URCaps-laajennusta.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että kehitetty tarttuja tarjoaa joustavan ja monikäyttöisen ratkaisun teollisten leikkeiden käsittelyyn automatisoidussa ympäristössä. Tarttujan säätövara, kompakti rakenne ja helppo integroitavuus tekevät siitä soveltuvan vaihtelevaan tuotantoon. Jatkokehityksessä voitaisiin tarkastella muuan muassa erilaisten anturiratkaisujen integrointia tarttujan varmistamiseksi ja tarttujan laajempaa sovellettavuutta muihin tuotantoympäristöihin.

Avainsanat: robotiikka, tarttuja, automaatio, alipaine, teolliset leikkeet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Leevi Korhonen: Designing a gripper for a robot suitable for picking cut sheet products
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
April 2025

The objective of this Master's thesis was to develop a robot-attached gripper suitable for the automated picking of various industrial cut sheet products. These products vary significantly in shape, material, and dimensions. Current gripping solutions do not offer sufficient flexibility to handle diverse variations of these products without mechanical adjustments or multiple different grippers, which especially limits small and medium-sized companies from automating their production in a cost-effective manner.

The theoretical part of the thesis explored the properties of industrial sheet products, different gripping principles, and other developed grippers, seeking information on effective approaches to the problem. In addition to the literature review, a semi-structured interview was conducted to gather practical industry perspectives and challenges related to handling cut sheet products. The definition of the design requirements for the gripper being developed was made from the gathered information.

The practical part involved developing the gripper's structure using a constructive research approach. Preliminary tests were conducted to evaluate the performance of suction cup solutions with cut sheet products of varying sizes and shapes. Based on these test results, the actual gripper was designed, and a prototype was constructed accordingly. The gripper's design enables adjustment of its shape and gripping points, allowing it to handle various cut sheet components without manual adjustments.

The functionality of the gripper was assessed through tests involving the picking of various sheet products. The prototype proved effective and suitable for picking a diverse range of products. The gripper's user interface and control were implemented in a manner allowing direct integration with the Universal Robots UR5 industrial robot through the developed URCaps extension.

Based on the results, it can be concluded that the developed gripper provides a flexible and versatile solution for handling industrial cut sheet products in an automated environment. Its adjustable range, compact design, and ease of integration make it suitable for variable production scenarios. Future developments could explore integrating various sensor solutions to ensure grip reliability and broaden the gripper's applicability to other production environments.

Keywords: robotics, gripper, automation, vacuum, cut sheet products

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Kiitos vanhemmilleni ja ystävilleni jatkuvasta tuesta, sekä TH-Tools Oy:lle tuesta ja joustavuudesta tämän työn tekemiseen. Kiitos myös työssä haastatellulle teollisuuden edustajalle, sekä TECHBOOST-projektille, jonka kautta sain kiinnostavan ja monipuolisen aiheen työlleni.

Kiitos Tampereen Yliopistolle sekä työn ohjaajille Jyrki Latokartanolle ja Niko Siltalalle hyvästä ja asiantuntevasta ohjauksesta.

Tampereella, 10. huhtikuuta 2025

Leevi Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
1.1	Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset.	2
1.2	Työn rajaus	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	2
2.	Kirjallisuuskatsaus	6
2.1	Tiivisteet	6
2.1.1	Epämetalliset tiivisteet	9
2.1.2	Osittain metalliset tiivisteet	13
2.1.3	Metalliset tiivisteet	14
2.2	Tartuntaprosessi	15
2.3	Tartuntaperiaatteet	16
2.3.1	Kitkaan -, muotoon -, ja neuloihin perustuva tarttuminen.	17
2.3.2	Imutarttuminen ja Bernoulli-ilmiö	17
2.3.3	Akustinen tarttuminen	19
2.4	Tarttujen liike- ja säätömekanismit	20
2.5	Tarttujen anturit	28
2.5.1	Kappaletta mittaavat anturit	28
2.5.2	Tarttujan toimintaa mittaavat anturit	29
2.6	Tiedonsiirto laitteiden välillä	30
3.	Suunnitteluvaatimukset	33
4.	Tarttujan suunnittelu ja prototyyppi.	35
4.1	Suunnittelun lähtökohdat ja testit	36
4.2	Tarttujan liikemekanismin valinta.	41
4.3	Suunniteltu tarttuja	42
4.3.1	Tarttujan muoto.	45
4.3.2	Liikemekanismi	48
4.3.3	Ohjaus robotista	51
4.3.4	Tarttujan käyttö	55
4.4	Valmistettu prototyyppi	57
5.	Tulokset	60
6.	Analyysit ja päätelmät.	63
6.1	Vastaukset tutkimuskysymyksiin	63
6.2	Tulosten epävarmuustekijät.	64
6.3	Tulosten yleistettävyys.	65

6.4 Kehitetyn tarttujan merkittävyys	66
6.5 Jatkokehitystarpeet teolliseen käyttöön	67
6.6 Jatkotutkimusehdotukset	67
7. Yhteenveto	69
Lähteet	70
Liite A: Haastattelukysymykset	75

KUVALUETTELO

1.1	Työn rakennetta havainnollistava kaavio.	5
2.1	O-rengas asennettuna laippojen väliin uraan.	6
2.2	Levymäinen tiiviste asennettuna laippojen väliin.	7
2.3	Bernoulli-ilmiön toimintaperiaate. (Petterson ym. 2010, s. 519, kuva 1) . . .	19
2.4	GTac-Gripper. (Lu ym. 2022, s. 7233, kuva 1)	21
2.5	Yksisorminen tarttuja kahdella toimintatilalla. (Nishimura ym. 2022, s. 10192, kuva 1)	22
2.6	Useaa tartuntatapaa käyttävä pehmeä tarttuja. (Fang ym. 2022, s. 234, kuva 1)	24
2.7	Leukoja ja imukuppia käyttävä tarttuja. (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023, s. 10, kuva 11)	25
2.8	Ohjatusti muotoaan muuttava imukuppi. (Zhakypov ym. 2018, s. 2895, kuva 1)	27
2.9	Useaa imukuppia käyttävä tarttuja. (Jiang ym. 2023, s. 2, kuva 1)	28
2.10	UART-tiedonsiirron kytkentä ja kehyksen rakenne. Mukailten Kashyap ja Ravi (2020, kuvat 1 ja 2)	32
4.1	Testeihin käytetyt tiivisteet.	36
4.2	Pienen tiivisteiden nostaminen yhdellä B10-2 -imukupilla.	38
4.3	Pienen tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.	39
4.4	Keskisuuren tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.	40
4.5	Suuren tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.	40
4.6	Kehitetyn tarttujan malli Solidworks-ohjelmassa.	43
4.7	Tarttujan geometria yläpuolelta katsottuna.	44
4.8	Tarttujan muodon sivunäkymä.	46
4.9	Tarttujan muoto päältä varsien ollessa kiinni.	47
4.10	Tarttujan muoto päältä varsien ollessa auki.	47
4.11	Tarttujan liikemekanismin yleiskuva.	48
4.12	Kierreruuvi ja varren hammastus.	49
4.13	Imukuppien etäisyyden muutos per askelmoottorin askel.	51
4.14	Tarttujan ohjauksen rakenne.	52
4.15	URCaps-laajennuksen asetusnäkyminen.	52
4.16	URCaps-laajennuksen ohjelmanäkymä.	53
4.17	Tarttujan ohjauselektronikan kytkentäkaavio.	55

4.18 Tarttujan työkalukoordinaatisto tartunnan aikana.	56
4.19 Tarttujan prototyyppi UR5-robottiin kiinnitettynä.	58
4.20 Tarttujan prototyypin sisäinen mekanismi.	59
5.1 Pienen tiivisteeseen poiminta tarttujalla.	61
5.2 Keskisuuren tiivisteeseen poiminta tarttujalla.	62
5.3 Suuren tiivisteeseen poiminta tarttujalla.	62

1. JOHDANTO

Teolliset leikkeet ovat levymäisiä, suuremmasta levystä irti leikattuja tuotteita, joita käytetään monissa eri käyttökohteissa. Teollisuudessa tällaisia leikkeitä käytetään esimerkiksi tiivisteiden muodossa, jotka ovat tärkeitä komponentteja koneenrakennuksessa, kun halutaan saavuttaa tiiviitä liitoksia (Flitney 2014, s. 79). Leikkeitä voidaan valmistaa esimerkiksi käyttämällä vesileikkausta tai laserleikkausta, jotka ovat helposti automatisoitavia prosesseja. Kumpikin menetelmä käyttää CNC-ohjausta (Computer Numerical Control) leikkauksen ohjaamiseen, jonka avulla koneilla voidaan leikata joustavasti erilaisia muotoja. (H. Zheng ym. 1996)

Teollisuudessa tarvitaan nykyään suurta joustavuutta tuotannossa, sillä valmistettujen tuotteiden sarjakoot ovat usein pieniä, useita tuotteita voidaan valmistaa samanaikaisesti ja vaihto toisen tuotteen valmistukseen tulisi olla nopeaa. Perinteisissä robottia käyttävissä automatisoiduissa järjestelmissä tarvitaan usein muutoksien tekemistä järjestelmään, kun tuotteissa tapahtuu muutoksia. Muutoksien tekeminen voi sisältää esimerkiksi käytetyn robotin tarttujan vaihtamisen toiseen, sillä ne on usein suunniteltu jotakin tiettyä tehtävää varten. (Rosati, Minto ja Oscari 2017) Tarttujan vaihtaminen toiseen tai sen muokkaaminen jokaiselle erilaiselle tuotteelle erikseen voi olla liian kallista monelle pienelle tai keskisuurelle yritykselle (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023).

Leikkeiden poiminta automatisoidusti tuottaa työssä toteutetun haastattelun mukaan haasteita teollisuudessa, sillä niiden muodot, paksuudet, materiaalit ja koot vaihtelevat niiden käyttökohteesta riippuen. Tämän vuoksi leikkeiden poimintaan tarvitaan lisää tarttujavaihtoehtoja, jotka kykenevät tarvittavaan joustavuuteen. Joustavassa tuotannossa tulisi Rosati, Minto ja Oscari (2017) mukaan suosia pieneen tilaan sopivia tarttujia, joilla on suuri säätövara. Tällöin ne sopivat monen erilaisen tuotteen poimintaan. Uudenlaisten joustavaan käyttöön sopivien tarttujen kehitys on nykyisessä tutkimuksessa herättänyt kiinnostusta ja avaa uusia mahdollisuuksia automaatioon.

1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on selvittää suunnitteluvaatimukset ja kehittää robotin tarttuja, jolla voidaan poimia teollisia leikkeitä. Poimittavat leikkeet ovat levymäisiä ja vaihtelevan muotoisia. Tarttuja pyritään suunnittelemaan siten, että sen rakenteesta ja toimintaperiaatteesta olisi hyötyä yleisesti monissa eri leikkeitä käsittelevissä työvaiheissa.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitä tulee ottaa huomioon levymäisten leikkeiden poiminnassa?
2. Minkälainen tarttuja täyttää leikkeiden poiminnan suunnitteluvaatimukset?
3. Kuinka robotin ja tarttujan integraatio ja käyttö voidaan toteuttaa?

1.2 Työn rajaus

Työn suunnitteluvaatimukset ja testit käsittelevät leikkeinä vain Flitney (2014, s. 62) mukaisia pintojen väliin puristettavia tiivisteitä, jotta työn aihealueesta ei tule liian laaja. Lisäksi poimittavien leikkeiden tulee olla levymäisiä, ei-ferromagneettisia ja itsekantavia. Levymäisellä muodolla tarkoitetaan leikettä, joka on esimerkiksi leikattu irti suuremmasta levystä. Ferromagneettisia leikkeitä ei käsitellä, sillä työssä tehdyn haastattelun perusteella niiden poiminta ei tuota suuria ongelmia magneettisilla tarttujilla. Itsekantavuudella tarkoitetaan sitä, että poimittava leike ei saa liiaallisesti taipua oman painonsa alla sitä nostettaessa. Ei-itsekantavat leikkeet jätetään pois, koska niiden käsittely laajentaisi työn ongelman laajuutta merkittävästi.

Tarttujan suunnittelussa otetaan huomioon tietty koko- ja painoalue, joka on esitetty osiossa 3, mutta ääripäissä olevia kappaleita (hyvin pienet tai erittäin suuret ja raskaat leikkeet) ei käsitellä yksityiskohtaisesti. Lisäksi tarttujan tulee toimia teollisessa ympäristössä, jossa automatisoitu poiminta on tarpeen, mutta erityisiä ympäristöolosuhteita, kuten korkea lämpötila tai kemiallinen altistus, ei tässä työssä analysoida syvällisesti.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tässä osiossa käsitellään työssä käytettävät tutkimusmenetelmät, joita ovat konstrukttiivinen tutkimus ja puolistrukturoitu haastattelu. Lopuksi esitellään työn eteneminen kaavion avulla.

Konstruktiivinen tutkimus

Työssä käytetään konstruktivistista tutkimusta. Lukka (2014) mukaan konstruktivinen tutkimusote soveltuu reaali maailman ongelmien ratkaisemiseen ja se tuottaa uusia innovatiivisia konstruktoita. Uusi konstruktio voi olla esimerkiksi jokin malli, suunnitelma tai tuote. Tämän työn tapauksessa uusi konstruktio voi olla esimerkiksi leikkeiden poimimiseen soveltuva menetelmä tai uuden tarttujan prototyyppi. Konstruktivisen tutkimuksen prosessiin kuuluu Lukka (2014) mukaan seitsemän vaihetta:

1. Relevantin ongelman etsiminen – ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan tutkimusongelma, joka on sekä käytännöllisesti merkittävä että tieteellisesti kiinnostava. Tässä työssä ongelma liittyy robotin tarttujan suunnitteluun leikkeiden poimimista varten. Ongelman määrittely perustuu kirjallisuuskatsaukseen sekä teollisuuden toimijan haastatteluun, joilla varmistetaan aiheen relevanssi.
2. Tutkimusyhteistyön mahdollisuuksien selvittäminen – tämä vaihe varmistaa, että tutkimus voi hyödyntää olemassa olevaa tietoa ja asiantuntijoiden osaamista. Työssä hyödynnetään haastattelua yrityksen asiantuntijan kanssa, jotta kehitetty ratkaisu soveltuu käytännön tarpeisiin.
3. Syvällisen aiheen tuntemuksen hankkiminen – tässä vaiheessa tehdään kirjallisuuskatsaus aiheeseen liittyvästä teoriasta, aiemmista tutkimuksista ja olemassa olevista ratkaisuista. Tarkoituksena on varmistaa, että tutkimuksessa voidaan hyödyntää parhaita käytäntöjä ja vältetään jo aiemmin tunnistetut haasteet.
4. Ratkaisumallin innovointi ja konstruktion kehittäminen – kehitetään varsinainen ratkaisu tunnistettuun ongelmaan. Tässä työssä se tarkoittaa uuden tarttujan suunnittelua, jossa huomioidaan mekaaniset ja toiminnalliset vaatimukset. Tämä vaihe sisältää konseptien arvioinnin ja iteratiivisen kehitystyön.
5. Ratkaisun toteuttaminen ja testaus – rakennetaan prototyyppi ja suoritetaan kokeellisia testejä ratkaisun toimivuuden varmistamiseksi. Testausvaiheessa tarkastellaan muun muassa tarttujan suorituskykyä ja soveltuvuutta leikkeiden poimintaan.
6. Ratkaisun soveltamisalan pohtiminen – arvioidaan, missä muissa konteksteissa kehitetty ratkaisu voisi toimia ja miten sitä voitaisiin laajentaa muihin sovelluksiin. Esimerkiksi tässä työssä voidaan tarkastella, soveltuuko kehitetty tarttuja myös muiden materiaalien tai muotojen käsittelyyn.
7. Teoreettisen kontribuution tunnistaminen ja analysointi – lopuksi analysoidaan, miten tutkimus edistää teoriaa. Tavoitteena on paitsi ratkaista käytännön ongelma, myös tuottaa yleistettävää tietoa, jota voidaan hyödyntää tulevassa tutkimuksessa ja kehitystyössä.

Konstruktivinen tutkimusote on valittu tähän työhön, koska se mahdollistaa uuden, konkreettisen ratkaisun kehittämisen ja sen testaamisen käytännön sovelluksessa. Sen sys-

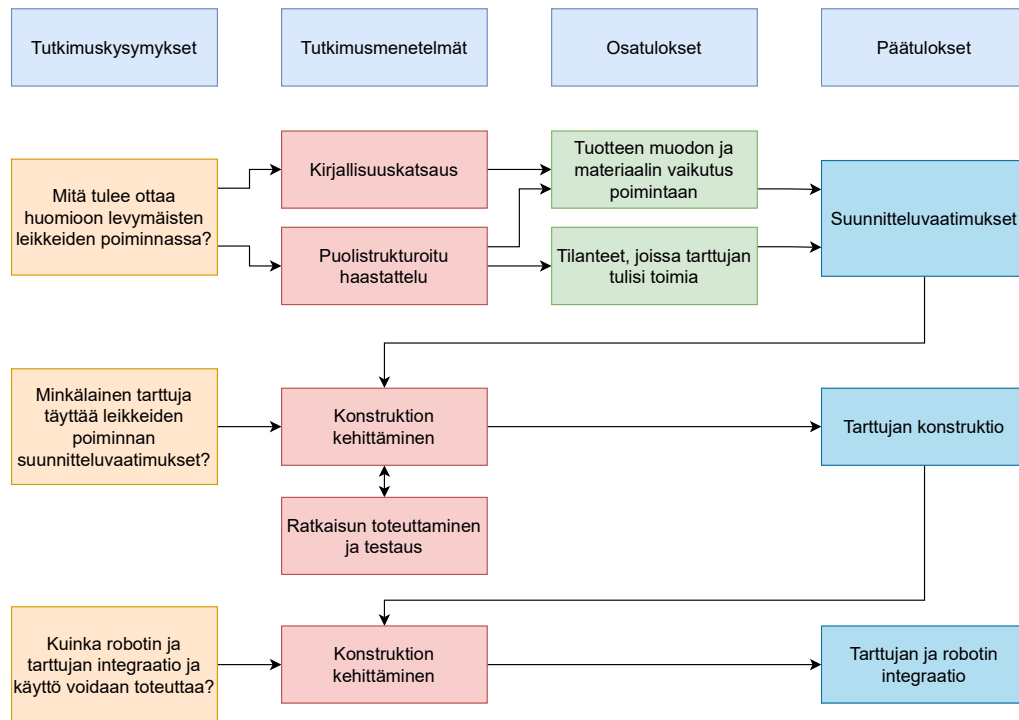
temaattinen etenemistapa varmistaa, että lopputulos ei ole vain teoreettinen, vaan myös käytännön tarpeisiin soveltuva ja laajemmin hyödynnettävä.

Puolistrukturoitu haastattelu

Työssä tehtävä haastattelu toteutetaan puolistrukturoituna haastatteluna. Tässä haastattelutyypissä on ennalta määritellyt kysymykset, mutta vastausvaihtoehtoja ei ole valmiiksi annettu. Tällöin saadaan tietoa halutusta aiheesta, mutta vastaukset ovat haastateltavan itse muotoilemia. (Saaranen-Kauppinen ja Puusniekka 2006)

Tässä tutkimuksessa haastattelua käytetään asiantuntijatiedon hankkimiseen, erityisesti teollisten leikkeiden käsittelyyn liittyen. Koska työn tekijällä ei ole syvällistä tietoa leikkeiden poimintaan liittyvistä yksityiskohdista, täysin strukturoitu haastattelu, jossa kaikki kysymykset ovat etukäteen tiukasti määriteltäviä, ei olisi paras lähestymistapa. Tällaisessa tapauksessa riski on, että oikeita kysymyksiä ei osata kysyä, ja haastattelu voi jäädä pintapuoliseksi.

Puolistrukturoitu haastattelu mahdollistaa tilanteen mukaan mukautuvan keskustelun, jossa voidaan tarvittaessa esittää tarkentavia kysymyksiä ja antaa haastateltavan itse ohjata keskustelua sellaisiin aiheisiin, joita ei olisi osattu ennakkoon ottaa huomioon. Tämä tekee haastattelusta joustavamman ja mahdollistaa sen, että tietoa saadaan myös niistä näkökulmista, joita ei olisi osattu ennalta arvata tärkeiksi.



Kuva 1.1. Työn rakennetta havainnollistava kaavio.

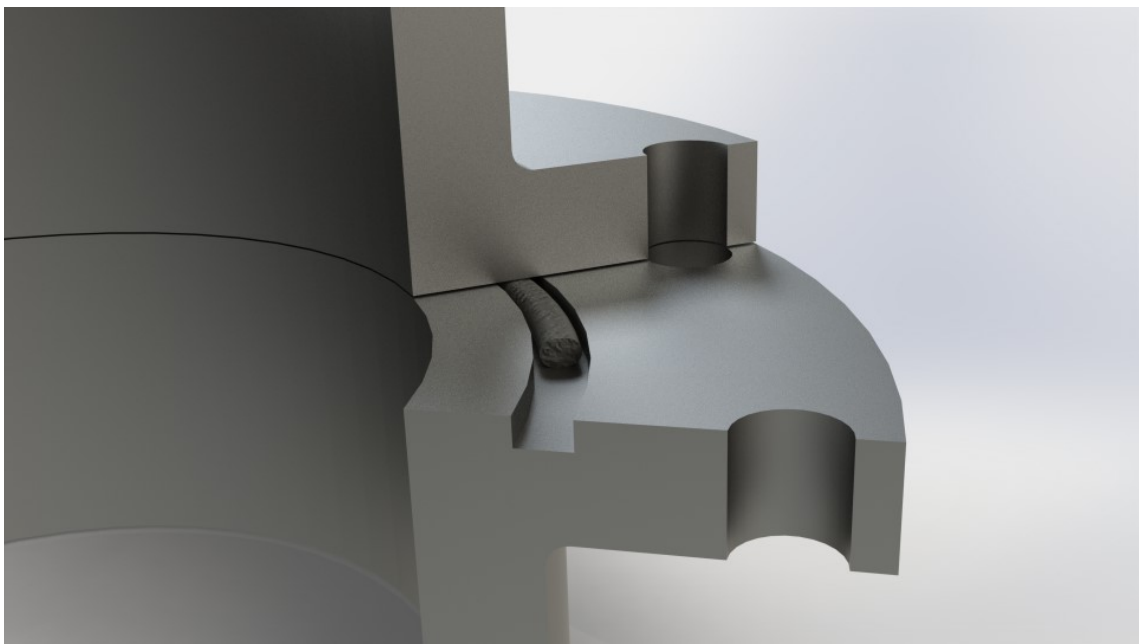
Kuvassa 1.1 nähdään työn suunniteltu eteneminen ja miten työn tuloksiin päästään. Työn eteneminen kaaviossa tapahtuu riveittäin vasemmalta oikealle jokaiselle tutkimuskysymykselle. Ensimmäisellä kaaviossa ylimpänä olevalla tutkimuskysymyksellä pohjustetaan kehitettävän tarttujan suunnitteluvaatimuksia. Tietoa haetaan kirjallisuuskatsauksella ja alan yritykseen tehtävällä haastattelulla. Toinen tutkimuskysymys johtaa tarttujan konstruktioon päätettyjen suunnitteluvaatimuksien pohjalta. Kolmas kysymys laajentaa toista kysymystä. Kysymyksellä selvitetään kehitetyn tarttujan integrointia osaksi robottia, sekä vaihtoehtoja tarttujan käyttöön ja ohjaamiseen.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä osiossa käsitellään työn aiheisiin liittyvää teoriaa. Ensimmäisenä käsitellään tiivisteitä, jotka ovat esimerkkejä teollisista leikkeistä. Niiden ominaisuuksista saadaan tietoa tartuntaa varten. Seuraavaksi käydään läpi tartuntaprosessin vaiheet sekä olemassa olevat kirjallisuudesta löytyvät tartuntaperiaatteet. Lisäksi tarkastellaan viimeaikaisten tutkimusten kohteena olevia tarttujia sekä niissä käytettäviä mekanismeja, säätöjä ja antureita. Lopuksi käsitellään lyhyesti laitteiden välistä tiedonsiirtoa.

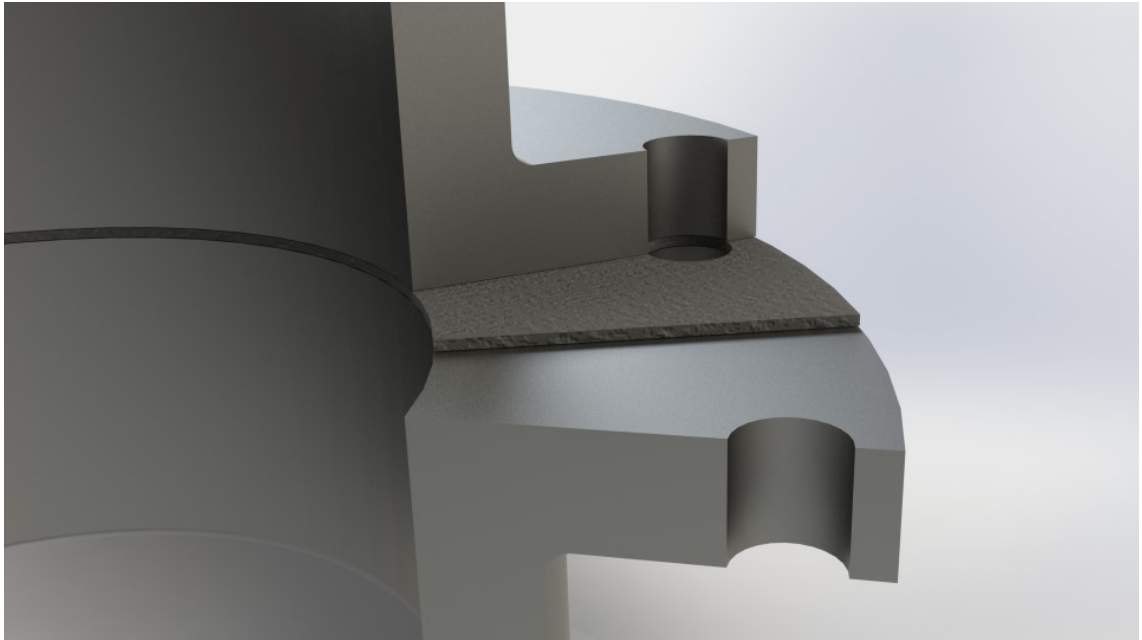
2.1 Tiivisteet

Flitney (2014, s. 62) jakaa tiivisteet kahdenlaisiin tyypeihin: paineesta aktivoituihin (eng. seal) ja pintojen väliin puristettaviin (eng. gasket). Paineesta aktivoituvissa tiivisteissä tiiviste pitää alustavasti vain pienillä paineilla. Paineen kasvaessa sen ominaisuudet tai rakenne saavat sen aktivoitumaan, eli puristumaan kovemmin pintoja vasten. Tällöin tiivisteiden tiivistyskyky kasvaa ja lopullinen paineensietokyky on suurempi. Tällaisia tiivisteitä ovat esimerkiksi tavalliset O-renkaat, jotka on asennettu pienellä alkupuristeella uraan. (Flitney 2014, s. 62)



Kuva 2.1. O-renkas asennettuna laippojen väliin uraan.

Flitney (2014, s. 62) mukaan pintojen väliin puristettavat tiivisteet toimivat myös aktivoitumalla, mutta niiden aktivointi toteutetaan asennusvaiheessa kohdistamalla niihin puristusvoima. Gawande (2019) määrittelee pintojen väliin puristettavan tiivisteiden olevan asia, joka laippojen väliin puristettuna täyttää niiden raon ja estää vuotoja niiden välistä. Tämä tiivisteeseen kohdistettu puristusvoima mahdollistaa pintojen välisen tiiveyden. Lisäksi tiiviste pystyy siten vastustamaan paineen aiheuttamia voimia. Joissakin tiivisteissä saattaa olla piirteitä sekä paineesta aktivoituvista- että pintojen väliin puristettavista tiivisteistä. Tällöin luokittelu näiden kahden tyyppin välillä ei ole yksiselitteistä. (Flitney 2014, s. 62)



Kuva 2.2. Levymäinen tiiviste asennettuna laippojen väliin.

Pintojen väliin puristettavia tiivisteitä on suuri määrä erilaisia (Flitney 2014, s. 78), mutta niitä yhdistävät tietyt pääperiaatteet niiden toiminnan kannalta. Tiivisteiden tulee pystyä mukautumaan laippojen pintoihin puristuksen aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että tiivisteiden tulee olla tarpeeksi joustava tai pehmeä pintoihin mukautumista varten, sillä laippojen pinnoissa saattaa olla epätäydellisyyksiä. Tiivisteiden tulee kuitenkin samanaikaisesti kestää siihen kohdistuvia mekaanisia voimia, jotta tiiviste ei pursotu laippojen välistä, muuta muotoaan ajan saatossa tai lähde liikkumaan. Tiivisteille on määritetty käyttökohteesta riippuen sallitut vuotomäärät. Tiivisteiden täytyy estää mahdollisia vuotoja sekä tiivistemateriaalin sisällä että tiivisteiden ja laipan pintojen välillä, jotta pysytään sallitun vuotomäärän alla. Tiivistetyn liitoksen tulee myös olla purettavissa ja kasattavissa uudelleen. (*Gasket Handbook* 2017, s. 13-16) Käytettyä tiivistettä ei kuitenkaan tulisi käyttää uudelleen (Flitney 2014, s. 70).

Gasket Handbook (2017, s. 14) mukaan pintojen väliin puristettavien tiivisteiden asennuksessa, käyttöolosuhteissa ja asennuskohteessa voi olla poikkeamia tai epätäydellisyyksiä, jotka tulee ottaa huomioon suunnittelussa ja tiivisteiden ominaisuuksissa. Seuraavassa

listassa on poimittu joitakin näistä:

- Laippojen pintojen kahdenkeskinen vinous
- Laippojen epäkeskeisyys
- Heitot laippojen muodossa
- Urat, naarmut ynnä muut vastaavat laippojen pinnoissa
- Laippojen pintojen aaltomaisuus
- Laippojen liikkuminen asennuksen aikana
- Käyttölämpötilan muutokset käytön aikana
- Käyttöpaineen muutokset käytön aikana
- Ulkoisten olosuhteiden muutokset
- Vuototestauksen aikainen korkeampi paine. (*Gasket Handbook* 2017, s. 14)

Yllä olevassa listassa mainitaan muun muassa ulkoisten olosuhteiden muutokset, jotka voivat vaikuttaa itse tiivisteeseen lisäksi myös laippoihin ja sitä kautta epäsuorasti tiivisteeseen. Esimerkiksi lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa tiivisteeseen kohdistuvaan puristusvoimaan muutoksia, sillä lämpölaajenemisella on vaikutuksia ympäröivään rakenteeseen. Joillakin pehmeillä tiivistemateriaaleilla saattaa olla niin pieni murtolujuus, että tiiviste ei kestä tiivistettävän nesteen painetta ilman laippojen puristusta. Tämän takia on tärkeää, että tiiviste ja sen asennus on yhdessä suunniteltu siten, että tiiviste pysyy jatkuvasti tarpeeksi suuren puristuksen alla. Tällöin pintojen ja tiivisteiden välinen kitka pitää tiivisteiden paikallaan ja estää sen murtumisen. (*Gasket Handbook* 2017, s. 17)

Flitney (2014, s. 78) mukaan pintojen väliin puristettavat tiivisteet voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan:

1. Epämetalliset (vaihtoehtoisesti *Gasket Handbook* (2017) mukaan 'pehmeät')
2. Osittain metalliset
3. Metalliset

Näihin kategorioihin kuuluvat tiivistemateriaalit käydään omilla alaluvuillaan läpi, sillä niiden materiaalit ja rakenne ovat osittain erilaisia. Työn rajaus sulkee ferromagneettiset tiivisteet työn ulkopuolelle, mutta esimerkiksi osa ruostumattomista teräksistä eivät ole ferromagneettisia. Tämän takia myös osittain metalliset- ja metalliset tiivisteet käsitellään omilla alaluvuillaan. Tiivisteistä käsitellään ainoastaan niitä, jotka ovat levyjä. Tällöin esimerkiksi uritetut tiivisteet ja kampaprofiilit jäävät pois käsittelystä, sillä niitä ei ole mahdollista leikata irti suuremmasta levystä vapaavalintaiseen muotoon.

2.1.1 Epämetalliset tiivisteet

Erilaiset tiivisteiden konstruktiot ja niissä käytettävät erilaiset materiaalit sopivat erilaisiin käyttökohteisiin. Epämetallisiin tiivistemateriaaleihin kuuluvat muun muassa elastomeerit, kuitumateriaalit, polytetrafluorieteeni (PTFE) ja grafiitti. (Flitney 2014, s. 78-84) Müller ja Nau (1998, s. 17) mukaan termejä elastomeeri ja kumi käytetään tiivisteiden yhteydessä usein tarkoittamaan samaa asiaa. Lisäksi tiivistemateriaaleista puhuessa käytetään usein niiden pääasiallisen raaka-aineen nimeä, mutta erilaisia laatuja voi olla lukuisia saman nimityksen alla. Näin ollen pelkkä kutsumanimi ei yleensä täysin määrittele kyseessä olevaa materiaalia. (Müller ja Nau 1998, s. 17)

Puhtaasti epämetalliset tiivisteet ovat yleensä levymäisessä muodossa (Flitney 2014, s. 78). *Gasket Handbook* (2017, s. 24) mukaan epämetallisten tiivisteiden materiaali tulee tyypillisesti 60" eli 1524 mm leveänä levynä, jonka pituus vaihtelee valmistajan mukaan. Tyypilliset tiivistelevyjen paksuudet euroopassa ovat 0.75 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm ja 3.0 mm. Vastaavasti Pohjois-Amerikassa tyypilliset paksuudet ovat 1/32", 1/16" ja 1/8", jotka ovat millimetreiksi muutettuna noin 0.79 mm, 1.59 mm ja 3.18 mm. Myös muita paksuuksia löytyy. (*Gasket Handbook* 2017, s. 24)

Elastomeerit

Elastomeerejä eli kumeja käytetään yleisesti sekä homogeenisissä että komposiittitiivisteissä (*Gasket Handbook* 2017, s. 33). Elastomeerit ovat polymeerejä ja ne koostuvat pitkistä polymeeriketjuista. Polymeeriketjut ovat toisissaan kiinni harvakseltaan niiden pituuteen nähden, joka mahdollistaa niiden joustavuuden (Müller ja Nau 1998, s. 30). Elastomeereillä on Müller ja Nau (1998, s. 18) mukaan kolme tärkeää materiaaliominaisuutta, jotka tekevät niistä hyödyllisiä tiivistämisessä:

1. Pienen kimmokertoimen ja suuren murtovenymän yhdistelmä. Tämän ansiosta kumi venyy ja taipuu helposti, mutta palautuu alkuperäiseen muotoonsa vielä suurienkin muodonmuutosten jälkeen.
2. Suuri Poissonin vakion arvo. Tämä tarkoittaa sitä, että kumi pystyy tuottamaan puristettaessa melko tasaisen paineen myös sivusuuntaan puristussuuntaan nähden. Näin ollen kumista tehty tiiviste pystyy tuottamaan tasaisen paineen tiivistepintoihin.
3. Pieni liukumoduulin ja kokoonpuristumattomuuden yhdistelmä. Kumi pystyy siten muuttamaan muotoaan helposti ilman tilavuuden muutosta.

Vastaavasti *Gasket Handbook* (2017, s. 33-34) listaa kumien hyödyllisiä ominaisuuksia, jotka laajentavat ylempää listaa suunnittelun ja valmistuksen näkökulmasta:

1. Kumeja on olemassa montaa eri laatua, jolloin myös vaihtoehtoja erilaisilla fyysisillä

ominaisuuksilla on paljon. Fyysisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi puristuslujuus, vetolujuus, kovuus ja venymisen kesto.

2. Kumien vahvistaminen kankailla tai metallilla on mahdollista, jolloin voidaan säästää esimerkiksi suurempi kestävyys murtumista vastaan.
3. Kumeja voidaan valmistaa asiakkaan toiveiden mukaan halutuilla mitoilla, väreillä ja pinnanlaaduilla.
4. Kumien valmistus esimerkiksi ruokaturvalliseksi on mahdollista, kun käytetään vain ruokaturvallisia ainesosia.

Müller ja Nau (1998, s. 33-36) kertovat yleisistä suunnitteluperiaatteista sopivien elastomeerien valintaan tiivisteeseen. Eri kumilaaduilla on erilainen kestävyys erilaisia kemikaaleja ja lämpötiloja vastaan. Ensimmäiseksi tulisi keskittyä siihen, että tiivisteessä käytettävä kumi on yhteensopiva sen nesteen tai kaasun kanssa, jota vastaan tiivistystä tehdään. Tiivistettävän aineen lisäksi myös tiivisteeseen ympäristön muut aineet tulisivat olla yhteensopivia sen kanssa. Samanaikaisesti näiden kemiallisten yhteensopivuuksien kanssa kumin sallitun käyttölämpötilan tulee olla myös yhteensopiva koko sen käyttökohteen lämpötila-alueen kanssa. Jotkin kumilaadut voivat heikentyä tai hajota esimerkiksi kosketuksesta mineraaliöljyjen kanssa, joita käytetään yleisesti koneissa. Myös esimerkiksi kuumalla vedellä, metanolilla, hapoilla ynnä muilla kemikaaleilla voi olla vastaavia vaikutuksia riippuen kumilaadusta. (Müller ja Nau 1998, s. 33)

Esimerkiksi FPM-kumi ei kestä polaarisia nesteitä, kuten kuumaa vettä, mutta se kestää hyvin kosketusta muiden hyvin aggressiivisten kemiallisten kanssa laajalla lämpötila-alueella. Vastaavasti EPDM-kumi kestää hyvin kuumaa vettä ja vastaavia kemikaaleja, mutta se ei kestä mineraaliöljyä. Polyuretaanikumeja käytetään laajalti hydraulikassa niiden hyvän kulumisenkeston vuoksi, mutta myös ne kärsivät heikosta kestävydestä kuumaa vettä vastaan ja melko pienestä maksimikäyttölämpötilasta. Lisäksi jotkin öljyjen lisäaineet saattavat olla yhteensopimattomia monien kumilaatujen kanssa, jolloin esimerkiksi ACM-kumit eli akryylikumit voivat sopia käyttötarkoitukseen. Korkeilla, yli 200 asteen lämpötiloilla, parhaita elastomeerivaihtoehtoja on perfluoroelastomeeri eli FFKM-kumi, jolla on myös hyvä kemikaalikestävyys. (Müller ja Nau 1998, s. 33-36)

Elastomeereista NBR-kumi on Müller ja Nau (1998, s. 34-36) mukaan kaikista yleisimmin käytetty. Sen käyttölämpötila on *Gasket Handbook* (2017, s. 61) taulukon mukaan noin -30 - 100 °C alue, joka on taulukon mukaan keskitasoa yleisistä elastomeereista.

Kuituvahvisteiset tiivisteet

Epämetalliset tiivisteet ovat yleensä joko homogeenisiä tai komposiitteja. Homogeeniset tiivisteet on tehty vain yhdestä materiaalista, eli niiden koostumus on sama koko tiivisteiden läpi. Komposiittitiivisteet puolestaan on tehty useasta eri materiaalista, jolloin eri

materiaalien hyvät puolet saadaan käyttöön yhdessä. *Gasket Handbook* (2017, s. 24-25) mukaan komposiittitiivisteissä on yleensä neljä komponenttia, joilla on omat tehtävänsä: kuitu, sidosaine, täyteaine ja pinnoitteet.

Kuiduilla voidaan kasvattaa tiivisteiden vetolujuutta ja puristuksen kestoa. Kuitu voi olla esimerkiksi lasikuitua, aramidikuitua tai muuta kuitua. (*Gasket Handbook* 2017, s. 24-25) B. Zhang ym. (2021) tutkivat aramidikuiduilla vahvistetun tiivistemateriaalin mekaanisia ominaisuuksia. Tiivistemateriaalin sidosaineena oli nitrilikumi eli NBR. Artikkelissa saatiin kyseisen tiivistemateriaalin murtolujuudeksi näytteen orientaatiosta riippuen 5.6 - 19.2 MPa ja murtovenymän suurin arvo oli 0.12. (B. Zhang ym. 2021) Vastaavasti Li ym. (2018) saamat tulokset puhtaan nitrilikumin mekaanisista ominaisuuksista ovat noin 2 MPa murtolujuus ja murtovenymä 7. Tuloksista nähdään moninkertainen ero kuituvahvistetun tiivisteiden hyväksi murtolujuudessa ja noin 58 kertaa pienempi venymä. Näin ollen kuidulla vahvistettu tiiviste on huomattavasti vahvempi ja jäykempi kuin homogeeninen kumitiiviste. (Li ym. 2018)

Sidosaineella saadaan komposiittitiivisteiden eri materiaalit pysymään yhdessä ja sillä voidaan kasvattaa tiivisteiden joustavuutta. Sidosaine on usein jokin elastomeeri, eli kumi. (*Gasket Handbook* 2017, s. 24-25) Elastomeerit käsiteltiin aiemmassa osiossa.

Täyteaineen avulla tiivisteiden kestävyyttä kylmämyötöä eli ulkoisista voimista johtuvaa pysyvää muodonmuutosta vastaan voidaan kasvattaa. Lisäksi täyteaineella voidaan alentaa tiivisteiden hintaa. Täyteaine voi olla esimerkiksi savea, mica-jauhetta tai hiilimustaa. (*Gasket Handbook* 2017, s. 24-25) Long, Nascarella ja Valberg (2013) mukaan hiilimusta on hienojakoista mustaa jauhetta, joka on melkein puhdasta hiiltä. Yksi sen suurimmista käyttökohteista on kumien vahvistusaineena (Long, Nascarella ja Valberg 2013). Esimerkiksi Tunnicliffe (2021) kuvailee artikkelissaan hiilimustan käyttöä luonnonkumin vahvistukseen. Artikkelin mukaan hiilimustan lisääminen kumin sekaan lisää sen kulumisenkestävyyttä, mekaanisia ominaisuuksia ja pienentää halkeamien leviämistä (Tunnicliffe 2021). Bauman (2008, osio 2.2 s. 14) esittämästä kuvaajasta nähdään, että kumin kovuus kasvaa pääosin lineaarisesti suhteessa lisätyn hiilimustan määrään. Lisäksi mainitaan, että kumia vahvistavan täyteaineen ja kumin hintaa alentavan täyteaineen raja ei ole tarkasti määritetty. Näin ollen vahvistava täyteaine voi samanaikaisesti alentaa kumin hintaa tai hintaa alentava täyteaine voi myös vahvistaa kumia. (Bauman 2008, osio 2.2 s. 14)

Pinnoitteilla voidaan estää tiivisteiden liiallinen tarttuminen asennuskohteeseen. Tällöin sen irroittaminen on helpompaa, jos liitos täytyy purkaa. Pinnoitteena voidaan käyttää muun muassa polytetrafluorieteeniä (PTFE) tai grafiittia. (*Gasket Handbook* 2017, s. 24-25)

Polytetrafluorieteenitiivisteet (PTFE)

X. Zheng ym. (2017) kertoo, että PTFE-materiaaleja käytetään laajasti tiivisteinä laippaliitoksissa. PTFE:llä on erinomainen korroosionkesto ja lisäksi Campbell ym. (2019) mukaan pieni kitkakerroin muihin materiaaleihin verrattuna, pieni pintaenergia ja hyvä lämpöstabiilius. Huang ym. (2021) mukaan materiaalit, joilla on pieni pintaenergia, vastustavat tarttumista muihin materiaaleihin niiden kemiallisen reagoimattomuuden ja korkean veden hylkivyyden takia. *Gasket Handbook* (2017, s. 30) mainitsee, että PTFE:n huono puoli on sen heikko vastustuskyky muodonmuutoksia vastaan puristuksen alla, joka heikenee entisestään lämpötilan kasvaessa. PTFE-tiivisteitä on kolmea päätyyppiä: puhdas PTFE, täytetty ja paisutettu (*Gasket Handbook* 2017, s. 31).

Täytetyn PTFE:n ominaisuudet eroavat puhtaan PTFE:n ominaisuuksista riippuen käytetystä täyteaineesta. Osa täyteaineista ei välttämättä ole yhteensopivia tiivistettävän aineen kanssa, jolloin tiivisteiden korroosionkesto voi kärsiä. Tämän huonon puolen kääntöpuolena on kuitenkin kasvanut vastustuskyky puristuksen aiheuttamia muodonmuutoksia vastaan, josta on hyötyä jos käyttökohde sitä vaatii. Täyteaineita on valittavana useita erilaisia riippuen vaaditusta kemiallisesta yhteensopivuudesta ja muista suunnitteluun vaikuttavista asioista. Yleisimpiä täyteaineita PTFE:lle ovat muun muassa piiksidit, lasi, kuidut, hiili, alumiini ja pronssi. (*Gasket Handbook* 2017, s. 32)

Paisutettu PTFE on huokoinen versio normaalista PTFE:stä. Vail ym. (2011) mukaan paisutetun PTFE:n huokoisuus voi olla 5 - 90 % välillä ja sen vahvuus painoon verrattuna on suurempi kuin täysin kiinteällä PTFE:llä. Lisäksi sen vastustuskyky pysyviä muodonmuutoksia vastaan pitkäaikaisten kuormien alla on suurempi (Vail ym. 2011). Paisutetussa PTFE:ssä säilytetään normaalin PTFE:n korroosionkesto, koska täyteaineita ei tarvitse käyttää. Huokoisen rakenteen takia tämän materiaalin kokoonpuristuvuus on hyvä ja se muotoutuu hyvin tiivistettävien pintojen muotoihin. (*Gasket Handbook* 2017, s. 32)

Paisutetut grafiittitiivisteet

Paisutettua grafiittia käytetään tiivisteissä, koska sillä on hyvä kestävyys korkeita lämpötiloja ja monia kemikaaleja vastaan. Materiaalin rakenne koostuu mikroskooppisista huokosista, jotka lukittuvat toisiinsa puristuksen alla. Paisutetun grafiitin kemikaalien vastustuskyky on hyvä, koska sitä voidaan valmistaa ilman lisättyjä sidosaineita. Lisäksi sidosaineiden puute mahdollistaa hyvän puristuspuheen säilyvyyden käytön aikana. (Flitney 2014, s. 82-83)

Grafiitin kestävyys vaurioita vastaan on heikko, joten sen varastoinnissa ja käsittelyssä tulee käyttää varovaisuutta. Grafiittitiivisteitä saa myös vahvistettuna esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä valmistetulla verkolla, jolloin materiaalin vahvuus ja jäykkyys kasvaa. Huonona puolena on se, että verkolla vahvistetun tiivistemateriaalin reunoista saattaa

tulla teräviä ja leikkaaminen voi olla vaikeampaa. Terävien reunojen syntymistä voidaan välttää esimerkiksi käyttämällä tiivisteiden muodon tekemiseen abrasiivista vesileikkauksella. (Flitney 2014, s. 82-83) Abrasiivisessa vesileikkauksessa käytetään korkeapaineista vettä, joka yhdessä abrasiivisten partikkelien kanssa johdetaan suuttimen läpi kohti leikkattavaa kappaletta ohuena suihkuna. Tällä suihkulla pystytään leikkaamaan useita materiaaleja tarkasti ja ilman merkittävästi kohonneita lämpötiloja. (Kroupa, Dana ja Zetek 2018)

Paisutettu grafiitti soveltuu ympäristöstä riippuen jopa 1000 °C lämpötiloihin, mutta kosketus ilman kanssa voi johtaa sen oksidoitumiseen ja hajoamiseen. Tästä syystä yleisesti käytetyt käyttölämpötilat tälle materiaalille ovat alhaisemmat. Oksidoitumista voidaan hidastaa käyttämällä osittain metallisia tiivisteitä. (Flitney 2014, s. 83)

Mica- ja vermikuliittitiivisteet

Mica-kuitujen käyttö tiivistemateriaalina tuottaa korkeita lämpötiloja ja hyvin kemikaaleja kestävästi tiivisteiden. Materiaalina mica-pohjaiset tiivisteet ovat melko heikkoja, sillä ne eivät luonteensa puolesta pysy itsekseen kasassa. Tämän takia sidosaineen tai metallisen vahvisteen käyttö on vaadittua. (Flitney 2014, s. 83) *Gasket Handbook* (2017, s. 30) mukaan mica-kuidut eivät oksidoidu, jolloin ne kestävät myös ilman kanssa kosketusta korkeissa lämpötiloissa.

Paisutettu vermikuliitti on materiaalina samaa sukua kuin mica-kuidut, mutta se valmistetaan vermikuliitti-mineraalia paisuttamalla. Vermikuliitin rakenne on erilainen kuin mica-kuitujen, joka mahdollistaa sen paisuttamisen. Paisutetun vermikuliitin huokoinen rakenne on hyvin samanlainen kuin paisutetun grafiitin. Tiivisteissä paisutettua vermikuliittia voidaan käyttää joko sellaisenaan, sidosaineeseen sekoitettuna tai metallilla vahvistettuna. Koska vermikuliitti on saman tyyppinen materiaali kuin mica, myös sillä on hyvä kestävyys oksidoitumista vastaan korkeissa lämpötiloissa. (*Gasket Handbook* 2017, s. 30; Flitney 2014, s. 83-84)

2.1.2 Osittain metalliset tiivisteet

Osittain metallisissa tiivisteissä on yhdistetty epämetallisia tiivistemateriaaleja ja metalleja erilaisissa konstruktioissa. Ne on suunniteltu käyttökohteisiin, joissa epämetallisiin tiivistemateriaaleihin verrattuna vaaditaan suurempaa lämpötilankestoa, paineenkestoa, puristuksen kestoja tai joissa esiintyy suuria virtausnopeuksia. Lisäksi tiivisteeseen lisätyllä metallilla voidaan saavuttaa parempi kulumiskestävyys, jos virtauksen seassa on esimerkiksi hankaavia aineita. (Flitney 2014, s. 78-84) Levymäisiä osittain metallisia tiivisteitä

ovat *Gasket Handbook* (2017, s. 37) mukaiset metallilla vahvistetut epämetalliset tiivisteet ja Bickford (1997, s. 109-110) mainitsema kumilla päällystetty metallitiiviste. Muut löydetyt osittain metalliset tiivisteet eivät sovi työn rajaukseen.

Metallilla vahvistetuissa epämetallisissa tiivisteissä on *Gasket Handbook* (2017, s. 37) mukaan metallinen noin 0.05 - 0.1 mm paksu metallinen kerros. Metallinen kerros sijaitsee levymäisen tiivisteiden sisällä, jonka molemmilla puolilla on kerros epämetallista tiivistemateriaalia. Käytetty metallinen kerros voi olla esimerkiksi jonkinlaista verkkoa, tasaista levyä tai rei'itettyä levyä, jotka on usein valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Myös muita metalleja voidaan käyttää käyttökohteesta riippuen. Epämetallinen tiivistemateriaali voidaan kiinnittää metallivahvistukseen sen tyypistä riippuen esimerkiksi liimaamalla tai mekaanisesti painamalla. (*Gasket Handbook* 2017, s. 37)

Kumilla päällystetty metallitiiviste eroaa metallilla vahvistetuista epämetallisista tiivisteistä käytetyn metallivahvisteen ja epämetallisen tiivistemateriaalin paksuuksissa. Kumilla päällystetyssä metallitiivisteessä kumin paksuus on vain 0.03 - 0.2 mm per puoli, kun tiivisteiden kokonaispaksuus on yleensä 0.4 - 1.6 mm. Tällöin metallisen keskiön paksuus on suhteessa huomattavasti suurempi. Bickford (1997) kirjan kirjoituksen aikaan akryylikumi ja NBR olivat tyypilliset käytetyt epämetalliset tiivistemateriaalit kylmämuovattuna teräslevyn päällä. (Bickford 1997, s. 109-110)

2.1.3 Metalliset tiivisteet

Flitney (2014, s. 89) mukaan metallisia tiivisteitä käytetään, kun tarvitaan suurta lämpötilankestoa ja/tai suurta paineenkestoa. Metallisia tiivisteitä on monia eri malleja sekä näiden muotoja ja asennusta määrittäviä standardeja on myös useita (Flitney 2014, s. 89-96). Tämän työn kannalta oleellisia metallisia tiivisteitä ovat *Gasket Handbook* (2017, s. 44-52) listauksen mukaisesti levymäiset metalliset tiivisteet sekä hitsattavat levymäiset tiivisteet.

Levymäiset metalliset tiivisteet ovat metallilevystä haluttuun muotoon leikattuja tasaisia tiivisteitä. Tiivisteiden ja laipan pinnanlaatu on kriittinen tiivistyksen onnistumiseksi. Lisäksi tiivisteiden asennuksessa siihen kohdistettava paine tulee olla tarpeeksi suuri, jonka takia tiivisteiden kontaktipinta-alaa tyypillisesti pienennetään jollakin keinolla. *Gasket Handbook* (2017, s. 44-45) Tarvittava pintapaine on Müller ja Nau (1998, s. 431) mukaan tyypillisesti 70 - 200 MPa luokkaa. Levymäiset metalliset tiivisteet valmistetaan yleensä suhteellisen pehmeistä metalleista, kuten kupari tai alumiini. Lisäksi nikkeliä tai muita materiaaleja voidaan käyttää, jos vaaditaan parempaa kemikaalikestävyyttä. Ruostumattoman teräksen käyttö on mahdollista, mutta sen vaatimat suuremmat pintapaineet vaativat samalla järeämmät laipat ja kiinnityksen. Vaadittua pintapainetta voidaan pienentää päällystämäl-

lä metallinen tiiviste pehmeämmällä materiaalilla, kuten PTFE:llä. (Müller ja Nau 1998, s. 431) Tällöin tiivisteestä tulee kuitenkin osittain metallinen tiiviste, joita käsiteltiin aikaisemmassa osiossa.

Hitsattavat levymäiset tiivisteet ovat muotonsa puolesta saman tyyppisiä kuin levymäiset metalliset tiivisteet, mutta ne asennetaan laippoihin hitsaamalla. Ne sopivat käyttökohteisiin, joissa liitos täytyy joskus pystyä purkamaan, mutta hitsattu liitos on kuitenkin vaadittu. Hitsatussa levymäisessä tiivisteessä hitsattu liitos ei ota vastaan laippoihin kohdistuvia voimia, vaan liitoksessa vaaditaan silti esimerkiksi pulteilla toteutettu kiinnitys. Hitsattavan tiivisteiden materiaalin tulee olla yhteensopiva hitsattavuuden puolesta laipan materiaalin kanssa ja mielellään myös korroosio-ominaisuuksien puolesta. (*Gasket Handbook* 2017, s. 52-53)

2.2 Tartuntaprosessi

Fantoni ym. (2014) mukaan tartuntaprosessilla on merkittävä rooli kappaleiden tehokkaassa käsittelyssä teollisuudessa. Tarttuminen vaikuttaa yksinkertaiselta prosessilta ihmisen näkökulmasta, mutta sen automatisoinnissa on useita haasteita. Tarttujien suunnitteluun vaikuttaa kappaleiden ominaisuudet, kuten muoto ja materiaali, sekä kappaleen tarttumista edeltävät ja seuraavat vaiheet prosessissa. Tartuntaa edeltäviä ja seuraavia vaiheita voivat olla esimerkiksi syöttö, käsittely, irrottaminen tai paikoitus. (Fantoni ym. 2014)

Tartuntaprosessi koostuu Fantoni ym. (2014) mukaan yleisesti seuraavista vaiheista:

1. Tarttujan lähestyminen lähelle poimittavaa kappaletta
2. Kontaktin tai muun vuorovaikutuksen syntyminen tarttujan ja kappaleen välille
3. Tartuntavoiman kasvattaminen joissakin rajoissa
4. Otteen varmistaminen kappaleesta, eli tartuntavoimaa kasvatetaan, kunnes kappale ei liiku itsenäisesti tarttujan suhteen
5. Kappaleen siirtäminen tarttujan avulla
6. Kappaleen vapauttaminen tarttujasta.

Näiden vaiheiden aikana voidaan käyttää erilaisia antureita tartuntaprosessin valvontaan. Kappaleen luotettava ja tarkka käsittely on tärkeää, jotta kappale ei vaurioitu ja tartunta sekä sitä seuraavat vaiheet onnistuvat. (Fantoni ym. 2014)

2.3 Tartuntaperiaatteet

Tichem, Lang ja Karpuschewski (2004) mukaan käytettävissä olevat tartuntaperiaatteet vaihtelevat kappaleen kokoluokan mukaan. Kappaleen koko vaikuttaa siihen, että missä suhteessa erilaiset fyysiset voimat vaikuttavat kappaleeseen. Tämän takia tartuntaan käytettävät menetöt tai tekniikat täytyy valita siten, että ne sopivat kyseessä olevalle kappaleelle. Fantoni ym. (2014) listaa 12 tartuntaperiaatetta ja kappaleiden kokoluokat, joille ne soveltuvat:

Tartuntaperiaate	Kappaleen kokoluokka		
	makro	meso	mikro
Kitkaan perustuva tarttuminen	X	X	X
Muotoon tarttuminen	X	X	X
Magneettinen tarttuminen	X	X	X
Imutarttuminen	X	X	X
Neulalla tarttuminen	X		
Sähköstaattinen tarttuminen		X	X
Van der Waals -voimaan perustuva tarttuminen		X	X
Jäätymiseen perustuva tarttuminen		X	X
Akustinen tarttuminen	X	X	X
Lasertarttuminen			X
Bernoulli-ilmiöön perustuva tarttuminen		X	X
Liimaan perustuva tarttuminen			X

Taulukko 2.1. Tarttumisperiaatteet ja kappaleen kokoluokat, joille ne soveltuvat.

Tichem, Lang ja Karpuschewski (2004) mukaan mikro-kokoluokan kappaleet vaihtelevat tyypillisesti alle millimetristä muutamaan millimetriin ja vastaavasti makro-kokoluokan kappaleet mahtuvat määritelmän mukaan sivun pituudeltaan 200 mm kokoisen kuution sisään.

Taulukon 2.1 tartuntaperiaatteista käydään seuraavissa kappaleissa tarkemmin läpi kitkaan -, muotoon -, ja neuloihin perustuva tarttuminen, imutarttuminen ja Bernoulli-ilmiö, sekä akustinen tarttuminen. Nämä tartuntaperiaatteet sopivat Fantoni ym. (2014) mukaan Bernoulli-ilmiötä lukuun ottamatta makro-kokoluokan kappaleille, jolloin ne voisivat sopia työssä käytettäväksi. Bernoulli-ilmiö sisällytettiin mukaan tarkempaan käsittelyyn, sillä se on toimintaperiaatteeltaan lähellä imutarttumista (Petterson ym. 2010), jolloin se on luontevaa käsitellä imutarttumisen ohessa. Magneettista tarttumista ei käsitellä tarkemmin, vaikka se sopii makro-kokoluokan kappaleille, sillä työssä on rajattu pois ferromagneettisten kappaleiden poiminta.

2.3.1 Kitkaan -, muotoon -, ja neuloihin perustuva tarttuminen

Mekaanisia tartuntaperiaatteita ovat kitkaan, muotoon ja neuloihin perustuvat tarttumat. Kitkaan perustuvissa tarttuimissa nostettavaan kappaleeseen kohdistetaan puristava voima esimerkiksi kahden leuan välissä. Tämä puristava voima aiheuttaa kitkavoiman syntymisen kappaleeseen, joka mahdollistaa sen liikkumisen tarttuman mukana, kun tarttujaa liikutetaan. Kitkaan perustuvan tarttuman leuat on yleensä muotoiltu jollakin tavalla tartuttavan kappaleen muodon mukaisesti, jolloin voidaan saavuttaa esimerkiksi pienempi pintapaine kontaktipinnoissa tai kappaleen automaattinen hakeutuminen oikeaan asentoon tarttuman leukoihin. Leukojen pinnoissa voidaan käyttää myös kumia tai muuta pehmeää materiaalia, jolloin ne pystyvät jollakin tasolla mukautumaan erilaisiin pintoihin. (Fantoni ym. 2014)

Muodon ympärille sulkeutuvat tarttumat perustuvat siihen, että kappaleen muotoa vastavat leuat lukitsevat kappaleen sisälleen sulkeutuessaan. Tällöin kappale ei pysty poistumaan leukojen välistä vaikka materiaalin kitkakerroin olisi nolla, sillä nostettava kappale on täysin lukittu tarttumaan sen muodon takia. (Honarpardaz ym. 2017) Kitkaan perustuvat ja muodon ympärille sulkeutuvat tarttumat ovat periaatteiltaan erilaiset, mutta joskus niiden erottaminen toisistaan ei ole yksinkertaista. Tämä johtuu siitä, että myös kappaleen muodon ympärille muotoillut leuat saattavat tuottaa kappaleen poimimista kitkavoiman, jolloin tartuntaperiaatteen luokittelu ei ole aina triviaalia. (Fantoni ym. 2014)

Neulalla tarttuminen toimii Fantoni ym. (2014) mukaan lävistämällä kappaleen pinta-neulalla, jonka jälkeen kappaleen voidaan sen avulla liikuttaa. Neuloja voi olla käyttökohteesta riippuen yksi (Karadağ ja Kılıç 2023) tai useampia (Fantoni ym. 2014). Neulojen käyttö kappaleiden poiminnassa saattaa vahingoittaa niiden pintaa. Pinnan vahingoittuminen täytyy tällöin ottaa huomioon poimintaa suunniteltaessa. (Fantoni ym. 2014) Osaa neuloihin perustuvista tarttuimista voidaan myös käyttää kitkaan tai muotoon perustuvan tarttuman tavoin pinnan lävistyksen lisäksi, kuten esimerkiksi Zhongkui Wang, Makiyama ja Hirai (2021) tapauksessa. Tässä artikkelissa on kuvattu neuloihin perustuva tarttuma, joka kykenee joustavan rakenteensa ansiosta sekä puristamaan neulat kappaleen ympärille että pistämään neulat kappaleen sisään ja sitten levittämään ne. (Zhongkui Wang, Makiyama ja Hirai 2021)

2.3.2 Imutarttuminen ja Bernoulli-ilmiö

Imutarttuminen

Imutarttumat perustuvat alipaineen muodostamiseen tarttuman ja poimittavan kappaleen välille. Alipaine tuottaa pintoja kiinni pitävän voiman ympäröivän ilmanpaineen seurauksena.

Alipaine saadaan pysymään tarttujan ja poimittavan kappaleen välillä imukuppia tai muuta rakennetta käyttämällä, jonka tehtävä on tiivistää tarttumiseen käytettävä alue. Imutarttujille on kehitetty erilaisia konstruktioita erilaisia tartuntatapauksia varten, sillä kappaleen materiaaliominaisuudet, pinnan muodot ja pinnan laatu vaikuttavat tiiviin kontaktin saavuttamiseen. Imutarttuminen saattaa vaurioittaa kappaleita, joiden pinta on pehmeä. (Koivikko ym. 2021)

Alipaine tartuntaa varten voidaan muodostaa passiivisesti tai aktiivisesti (Koivikko ym. 2021). Zhanwei Wang ym. (2023) mukaan passiiviset imutarttumat toimivat volumetrisellä muutoksella, jossa tarttujan ja kappaleen välille syntyvällä kontaktilla saadaan poistettua ilmaa niiden välistä. Poistettu ilma tuottaa toiminnan kannalta oleellisen alipaineen. Aktiivisissa imutarttuimissa alipaine muodostetaan ulkoisesti esimerkiksi pumpulla tai männällä. Ulkoisesti tuotettua alipainetta voidaan tämän jälkeen ohjata venttiileillä tarttujaan. Ulkoisesti tuotettu alipaine vie järjestelmänä paljon enemmän tilaa kuin passiivinen alipaineen tuotto ja kuluttaa enemmän energiaa. Hyviä puolia ovat kuitenkin vahva tartuntavoima ja mahdollisuus alipaineen tarkkaan ohjaukseen sekä tartuntaa että irroitusta varten. (Zhanwei Wang ym. 2023)

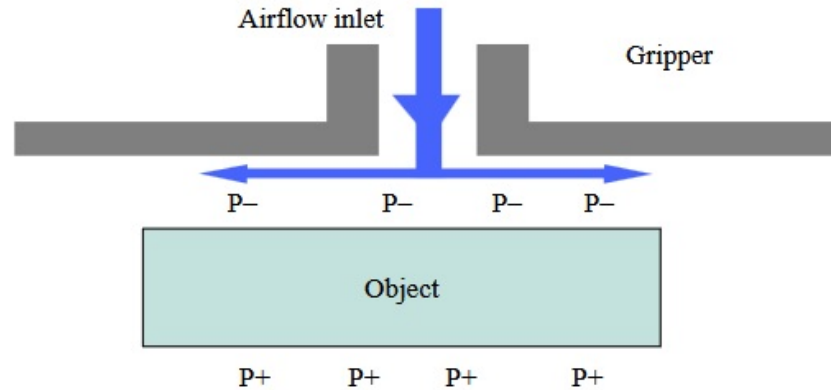
Maggi, Mantriota ja Reina (2022) mukaan imutarttumat voidaan jakaa jäykkiin ja pehmeisiin tarttujiin niiden rakenteen mukaan. Artikkelissa kuvaillaan tarttujaa, jossa monta pientä imukuppia sijaitsee tarttujassa joustavien varsien varrella. Kyseinen tarttuja pystyy näiden varsien avulla mukautumaan eri muotoisten kappaleiden muotoon. Tällä saavutetaan suurempi joustavuus tartuttavien kappaleiden suhteen, sillä samalla tarttujalla voidaan suorittaa suurempi määrä tartuntoja erilaisiin pinnanmuotoihin. Tarttuja kuuluu kirjoittajan mukaan jäykkiin tarttujiin, sillä se käyttää normaaleja heikosti pinnan muotoihin mukautuvia imukuppeja tartunnan aikana, vaikka sen varret kokonaisuutena taipuvat.

Vastaavasti H. Zhang ym. (2023) käyttää artikkelissaan alipainetarttujaa, jonka pinta on pehmeä ja se mukautuu tartunnan aikana muotonsa puolesta tartuttavaan kappaleeseen. Kyseinen tarttuja sisältää tyynyn, jonka sisältö on täytetty pienillä palloilla. Pallot sallivat ilman liikkumisen niiden välistä ja samanaikaisesti ne pystyvät liikkumaan tyynyn sisällä tartunnan aikana. Tämän ansiosta tyyny pystyy mukautumaan tartuttavaan muotoon ja pallojen tilavuus estää tarttujan tyynyä painumasta kokonaan kasaan. Tämä tarttuja määrittellään pehmeäksi tarttujaksi, sillä se pystyy mukautumaan hyvin erilaisiin pienempiinkin pinnanmuotoihin.

Bernoulli-ilmiö

Bernoulli-ilmiöön perustuva tarttuminen tuottaa Petterson ym. (2010) mukaan kappaleen ja tarttujan välille alipaineen käyttäen niiden välillä virtaavaa ilmaa. Ilmaa voidaan tuoda tarttujan ja kappaleen väliin esimerkiksi kuvan 2.3 mukaisesti tarttujan keskellä sijaitse-

vasta kanavasta, jolloin virtaus muodostuu tarttujan keskiöstä säteittäin ulospäin. Alipai-
neen muodostuminen vaatii jatkuvan ilmvirran, joten tarttujan ja kappaleen pinnat eivät
tasapainotilanteessa koske toisiinsa. Näin ollen bernoulli-ilmiöön perustuvat tarttijat toi-
mivat teoriassa ilman kosketusta kappaleeseen. (Petterson ym. 2010)



Kuva 2.3. Bernoulli-ilmiön toimintaperiaate. (Petterson ym. 2010, s. 519, kuva 1)

Petterson ym. (2010) kirjoittamassa artikkelissa on tehty testejä kolmiulotteisten kappalei-
den nostamisesta Bernoulli-ilmiötä käyttävällä tarttujalla. Tulosten havainnoista voidaan
nähdä, että kappaleiden liikkumista suhteessa tarttujaan tapahtuu useassa tilanteessa.
Artikkelissa mainitaan Bernoulli-ilmiöön perustuvan tartunnan olevan kitkatonta, jolloin
tartuttavan kappaleen kääntäminen tai paikallaan pitäminen on vaikeaa.

2.3.3 Akustinen tarttuminen

Röthlisberger ym. (2021) mukaan akustiset tarttijat pystyvät tarttumaan kappaleisiin il-
man fyysistä kontaktia. Tämä saavutetaan käyttämällä seisovia akustisia aaltoja, jotka
tuottavat painekentän tartuttavan kappaleen ympärille. Akustisessa tartunnassa materi-
aaliominaisuuksilla ei ole tartunnan puolesta merkitystä, toisin kuin esimerkiksi mekaani-
sissa tartuntaperiaatteissa, magneettitarttumisessa ja imutarttumisessa. Tiheämmät kap-
paleet vaativat suuremman akustisen paineen, jotta tarttujan kappaleeseen kohdistama
voima on suurempi kuin painovoima. (Röthlisberger ym. 2021)

Akustisia tarttujia voidaan toteuttaa Röthlisberger ym. (2021) näyttämän esimerkin mu-
kaan kaksipuoleisina tai yksipuoleisina. Kaksipuoleisissa akustisissa tarttujissa on aal-
toja tuottavia elementtejä molemmilla puolilla tartuttavaa kappaletta, kun taas yksipuo-
leisessa tarttujassa elementtejä on vain yhdellä puolella. Kaksipuoleiset tarttijat pysty-
vät kyseisessä tapauksessa nostamaan tiheämpiä kappaleita kuin yksipuoleiset tarttijat.
(Röthlisberger ym. 2021)

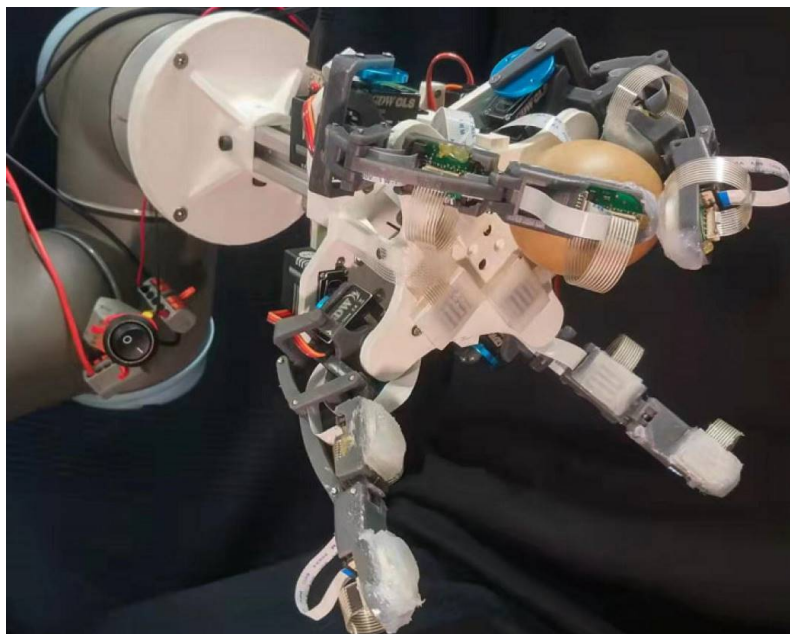
2.4 Tarttujen liike- ja säätömekanismit

Aiemmissa osioissa selvitettiin erilaiset tartuntaperiaatteet, joiden avulla tartunta on mahdollista. Tässä osiossa perehdytään erilaisiin kehitettyihin tarttuihin, jotka käyttävät näitä periaatteita. Tavoitteena on etsiä erilaisilla toimintaperiaatteilla ja rakenteilla toteutettuja tarttuvia, jotka on kehitetty erilaisia käyttötarkoituksia varten. Tarttujista selvitetään, että mihin käyttöön ne on suunniteltu, miten ne toimivat mekaanisesti, sekä miten ne suoriutuvat testeistä. Näin saadaan kuvaa alueen nykyisestä tutkimuksesta ja epäsuoraa kokemusta erilaisten ideoiden toimivuudesta omaa kehitystyötä varten.

Erilaisia tarttuvia on todella monia, joten kaikkia tarttuvia on mahdotonta käydä työn laajuudessa läpi. Näin ollen käsiteltäväksi on valittu joitakin tarttuvia, jotka edustavat toisistaan selvästi eroavia lähestymistapoja tarttumiseen. Valinnat on tehty työssä ratkaistavan ongelman pohjalta, jonka perusteella tarttujilta vaaditaan mukautuvuutta tai säädettävyyttä, kompaktia rakennetta, sekä kykyä soveltua teolliseen automaatioympäristöön ilman manuaalisia muutoksia. Valitut tarttumat kattavat laajasti erilaisia tartuntaperiaatteita sekä liike- ja säätömekanismeja.

Uudelleenkonfiguroitava tarttuja neljällä sormella ja taktiillisilla antureilla

Lu ym. (2022) esittelevät tarttujaa nimeltä "GTac-Gripper", joka on suunniteltu arkisten esineiden (eng. everyday objects) poimintaan ja käsittelyyn. Artikkelin mukaan näiden esineiden poiminta ja käsittely ovat olleet robotiikan alan pitkäaikaisia haasteita. Artikkelissa tavoitteena oli rakentaa sellainen tarttuja, joka pystyy suorittamaan useita erilaisia tartuntaliikkeitä pienellä määrällä liikkuvia niveliä. Tartunnassa käytettiin apuna taktiillisia antureita, joiden avulla saatiin tartunnan aikaista palautetta kosketusvoimien suuruudesta. Tämän palautteen avulla tarttuja pystyy käsittelemään paremmin eri tyyppisiä esineitä. (Lu ym. 2022)



Kuva 2.4. GTac-Gripper. (Lu ym. 2022, s. 7233, kuva 1)

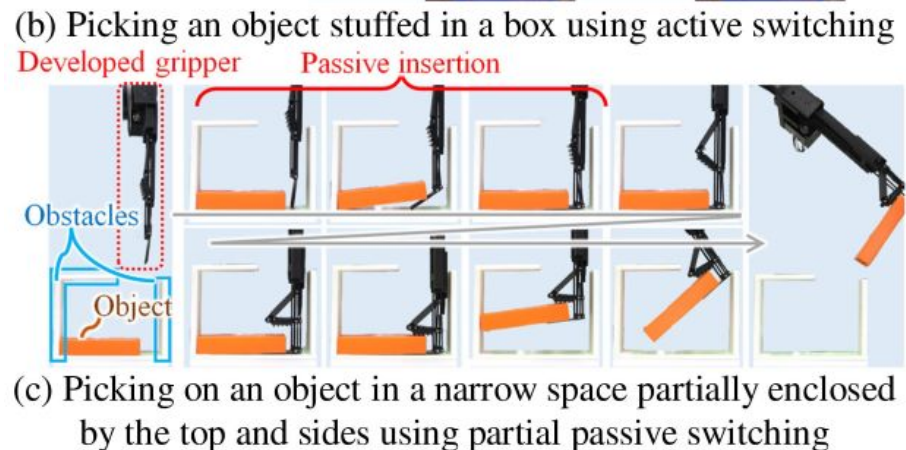
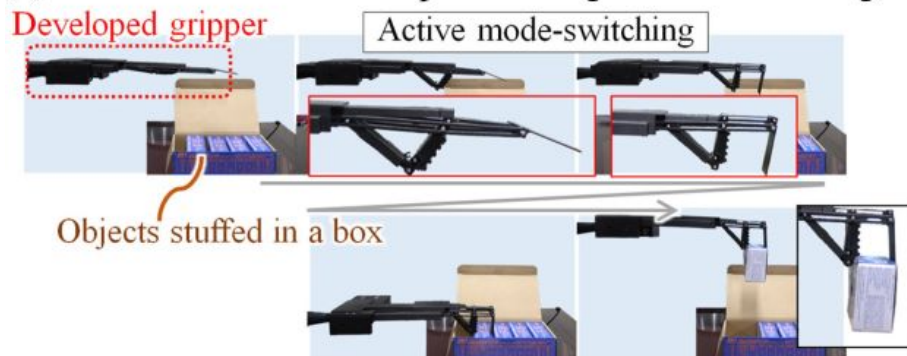
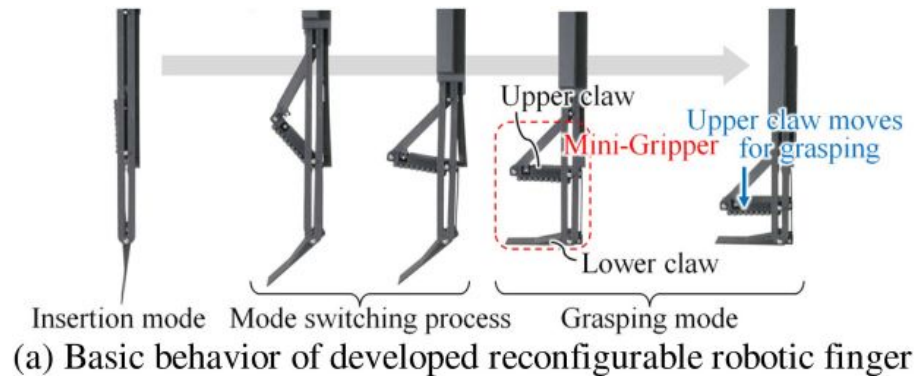
GTac-Gripperin rakenne koostuu uudelleenkonfiguroitavasta mekaniikasta, jossa tarttujan neljään sormeen ja kämmeneen on integroitu taktiilliset anturit. Jokaisessa sormessa on kaksi "luuta", jotka on yhdistetty toisiinsa normaaleilla nivelillä ja sormet on kiinnitetty tarttujan kämmeneen ihmisen tyviniveliltä matkivilla nivelillä. Tyvinivelet sallivat sormien kääntymisen itsenäisesti kämmenen pinnan normaalin ympäri. Sormet pystyvät mukautumaan poimittavaan kappaleeseen, sillä niiden liikeratoja ei ole täysin lukittu (eng. underactuated). Sormien liikuttaminen tehdään pienten servomootoreiden avulla. Tällä rakenteella GTac-Gripper pystyy viiteen erilaiseen poimintakonfiguraatioon, joissa se esimerkiksi puristaa kappaletta sormien välissä tai sulkee kappaleen sormien sisään "häkkiin". Poiminnan aikana tarttujan taktiillisista antureista saadaan 228 eri signaalia 150 Hz taajuudella, jotka sisältävät tietoa normaali- ja leikkausvoimista. (Lu ym. 2022)

Tarttujan suorituskykyä testattiin YCB Grasping Benchmark -testillä, jossa erilaisia ja eri muotoisia esineitä poimitaan tarttujalla. Jokaisesta esineiden kategoriasta saadaan prosentuaalinen tulos sen mukaan, että montako esinettä saatiin poimittua kaikista sen kategorian esineistä. Tarttujan kokonaistulos oli 65 % kaikkien kategorioiden kesken, joista parhaiten se pärjäs pyöreiden kappaleiden poiminnassa (93 %) ja taipuvien kappaleiden, kuten köysien, poiminnassa (90 %). Huonoin tulos oli levymäisten esineiden poiminnassa, jossa yhtäkään esinettä ei saatu nostettua. (Lu ym. 2022)

Kapeisiin tiloihin tarkoitettu yksisorminen uudelleenkonfiguroitava tarttuja

Nishimura ym. (2022) kehittämä tarttuja on suunniteltu kappaleiden poimintaan esimerkiksi laatikoista, joissa työskentelytilaa on vähän. Vähäisellä työskentelytilalla tarkoitetaan

artikkelin esimerkkien mukaan esimerkiksi sitä, että laatikossa oleva kappale on lähellä sitä laatikon reunaa, josta tartunta halutaan suorittaa. Tarttujan rakenne on suunniteltu siten, että se pystyy vaihtamaan kahden toimintatilan välillä tartunnan suorittamisen aikana. Ensimmäisessä toimintatilassa tarttuja pystyy työntymään "kynnellä" poimittavan kappaleen väliin tai alle poimintaa varten. Tämän jälkeen se siirtyy taittuvan rakenteensa avulla toiseen toimintatilaan, jossa se pystyy käyttämään alle työnnettyä kynttä ja yläpuolelle taittunutta leukaa tartuntaan. Tarttuja käyttää samaa moottoria molempiin toimintatiloihin ja niiden väliseen siirtymään. (Nishimura ym. 2022)



Kuva 2.5. Yksisorminen tarttuja kahdella toimintatilalla. (Nishimura ym. 2022, s. 10192, kuva 1)

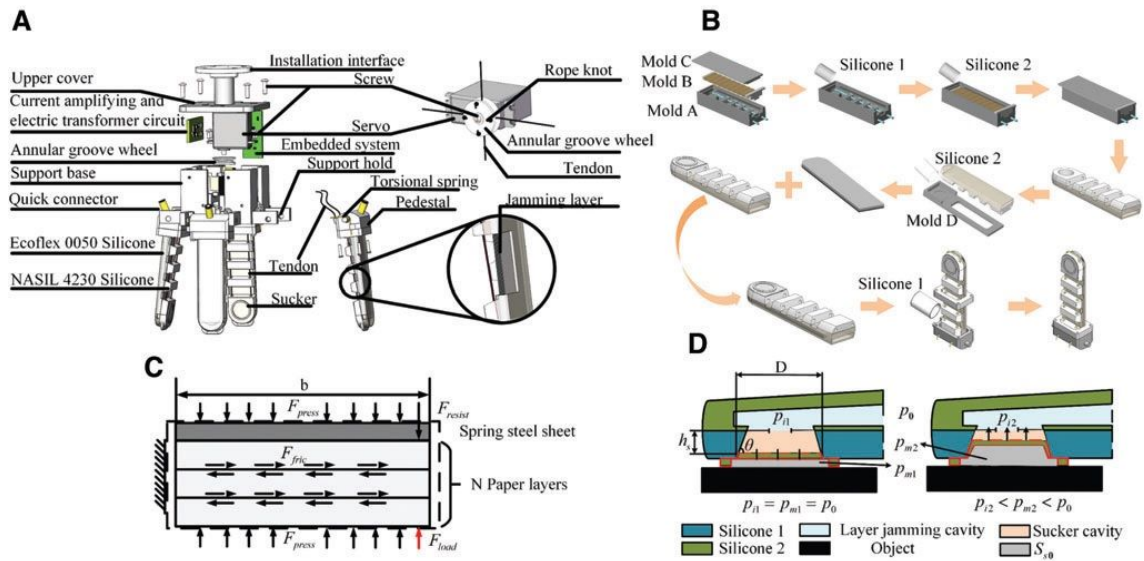
Tarttujan rakenne on suunniteltu siten, että se vie mahdollisimman vähän tilaa. Tästä syystä kyseinen tarttuja on yksisorminen. Tarttuja koostuu rungosta, sen ulommassa

päässä olevasta nivelöidystä kynnestä sekä rungon sisällä liukuvista ja kääntyvistä tangosta. Tarttujan siirtymä kynnen työntötilasta tartuntatilaan tapahtuu rungon yläpäässä olevan moottorin avulla. Moottori työntää hammasrattaan ja hammastetun tangon avulla rungon sisällä olevia tankoja eteenpäin, jolloin kynsi taittuu sivuttain muodostaen tartuntaa varten alemman leuan. Tämän jälkeen moottorin jatkaessa työntöä rungon sisällä olevat tangot lähtevät myös taittumaan, jolloin ne muodostavat ylemmän leuan tartuntaan rungon ulkopuolelle. Kun työntöä vielä jatketaan, ylempi leuka liikkuu kohti alemmaa leukaa ja näin saadaan aikaan puristava voima leukojen väliin, jolla poiminta on mahdollista. Tarttujan rakenne mahdollistaa myös kynnen työntämisen jotakin pintaa vasten tartunnan aikana, jolloin kynnen taittumista on mahdollista säätää passiivisesti ilman tarttujan moottoria. (Nishimura ym. 2022)

Tarttujan toimintaa testattiin kahdella kokeella, joista ensimmäisessä poimittiin vaihtelevan muotoisia esineitä pöydältä. Esineet olivat muun muassa stryroksinen ruokapakkaus ja muovinen mansikka. Toisessa kokeessa poimittiin laatikossa oleva kappale sekä kapeassa tilassa oleva kappale, johon pääsyä oli lisäksi rajoitettu päältä ja sivuilta. Artikkelin kuvien perusteella näissä kokeissa esitetyt poiminnat onnistuvat, sekä lisätietona on kerrottu, että tarttumiseen riittää $4mm$:n tila kappaleen sivulla. (Nishimura ym. 2022)

Pehmeä tarttuja, joka käyttää jänteitä ja kerrosmaista jäykistymistä

Fang ym. (2022) kertovat artikkelissaan pehmeästä tarttujasta, joka pystyy käyttämään useaa tartuntatapaa yhdellä rakenteella. Tarttujassa on neljä pehmeää modulaarista sormeaa, joihin on integroitu jänne, alipaineesta jäykistyvä kerros, sekä imukuppi. Tällä rakenteella pyritään saamaan joustavuutta erilaisten kappaleiden poimintaan eri ympäristöissä. Artikkelissa kerrotaan pehmeiden materiaalien ja pehmeiden robottien ottavat osittain inspiraatiota luonnosta, ja artikkelissa verrataan kyseessä olevaa tarttujaa osittain mustekalaan. (Fang ym. 2022)



Kuva 2.6. Useaa tartuntatapaa käyttävä pehmeä tarttuja. (Fang ym. 2022, s. 234, kuva 1)

Tarttujan rakenne koostuu sen rungosta ja neljästä pehmeästä modulaarisesta sormesta. Tarttujan rungon sisään on integroitu servomoottori, jolla tuotetaan sormien jänteille veto-voima niiden koukistamiseksi. Sormien rakenne koostuu kahdesta kerroksesta silikonia, joiden väliin on valettu pala levymäistä jousiterästä ja kerroksia paperia, sekä lisäksi kaksi jonkinlaista siimaa, jotka toimivat jänteinä. Jousiteräksen tehtävä on jäykistää sormien rakennetta ja toimia jousena, joka palauttaa sormen takaisin suoraksi koukistuksen jälkeen. Kerrokset paperia toimivat yhdessä jousiteräksen kanssa säädettävänä jäykisteenä. Kun sormen sisään vedetään alipaine, sen sisällä olevat paperikerrokset painuvat kiinni toisiinsa ja jousiterästä vasten. Näiden kerroksien välinen kitka tekee sormesta vaikeammin taivutettavan. Lisäksi sormen päähän on tehty valuprosessin aikana imukuppi, joka lisää tarttujan monikäyttöisyyttä. (Fang ym. 2022)

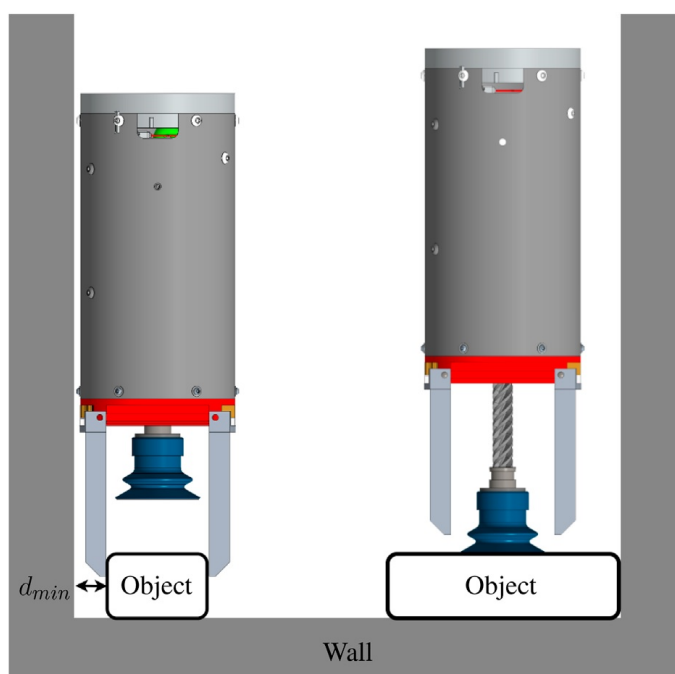
Artikkelissa esitellään tarttujan poiminnan suorituskykyä poimimalla erilaisia esineitä, kuten hedelmiä, pulloja, matkapuhelimia, levyjä ja kortteja. Poiminnoissa käytetään tarttujaa kolmessa eri toimintatilassa: ympäröivä tarttuminen (eng. enveloping grasping mode), puristava tarttuminen (eng. clamping mode) ja imutarttuminen (eng. sucking mode). Ympäröivässä tarttumisessa servomoottorin avulla sormet koukistetaan tartuttavan kappaleen ympärille, jonka jälkeen alipaineen avulla sormet jäykistetään tähän asentoon. Tämä tila sopii artikkelin mukaan painavampien esineiden poimintaan, kuten hedelmien ja pullojen. Puristava tarttumistila toimii päinvastaisessa järjestyksessä, jolloin alipaineen avulla ensin jäykistetään sormen taipuminen ja tämän jälkeen servomoottori vetää sormeja eri asentoon. Tällöin sormi taipuu juurestaan ja pysyy suurempana, jolloin sormen päällä voidaan tarttua esimerkiksi matkapuhelimeen jäykästi. Kolmannessa tilassa eli imutarttumisessa sormen pää työnnetään poimittavaa kappaletta vasten, jonka jälkeen alipaineen avulla sekä imukuppi että sormen jäykistyminen aktivoituvat samanaikaisesti. Tämä sopii

artikkelin mukaan esimerkiksi korttien tai levyjen poimimiseen. (Fang ym. 2022)

Artikkelissa esitettyä tarttujaa hieman vastaavia tarttujia on kehitetty useita, mutta hieman eri periaatteilla. Esimerkiksi Liu ym. (2021) esittelevät tarttujaa, jossa on neljän sormen sijaan kaksi sormea, ja sormien taivutus tapahtuu jänneiden sijaan sormessa sijaitsevien onkaloiden laajentamisella paineilmalla. Vastaavasti Meng ym. (2020) kehittämä kolmesorminen tarttuja tuottaa tartuntaan tarvittavan voiman paineilmalla toteutetulla taivutuksella, mutta tarttujan sormet avataan jänteitä käyttämällä sormien ollessa paineistettuna.

Kompakti tarttuja, joka yhdistää kaksileukaisen tarttujan ja imutarttujan

Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja (2023) kehittämä tarttuja on tarkoitettu useiden erilaisten kappaleiden poimintaan erityisesti laatikoista. Artikkelin mukaan kappaleiden poiminta laatikosta rajoittaa käytettävän tarttujan kokoa. Kyseessä oleva tarttuja sisältää kaksi tartuntaan käytettävää leukaa, sekä yhden tarttujan kämmenen keskellä olevan imukupin, joka pystyy työntymään leukojen ohi niiden ollessa avoinna. Tämän mekanismin ansiosta tarttuja pystyy poimimaan imukupilla kappaleita esimerkiksi laatikon reunasta ilman, että leuat estävät liikkeen. Leukojen liikkeitä ja imukupin työntö ulospäin tapahtuvat yhden moottorin avulla. Tarttujan fyysinen koko on artikkelin mukaan tehty mahdollisimman pieneksi, jolloin sen pyöreän rungon halkaisija on 75 mm. (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023)



Kuva 2.7. Leukoja ja imukuppia käyttävä tarttuja. (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023, s. 10, kuva 11)

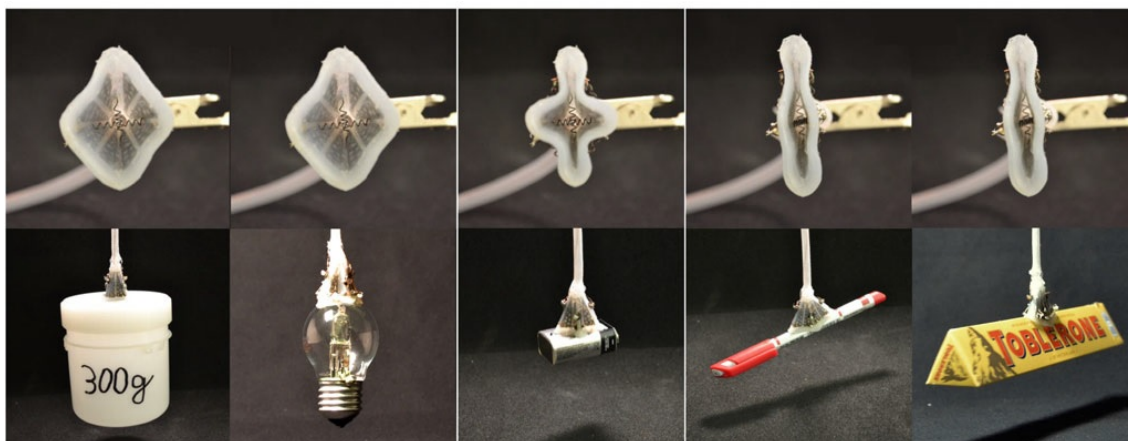
Tarttujan rakenne sisältää moniosaisen mekanismin, sillä yksi moottori liikuttaa sekä leu-

koja että imukupin työntymistä/vetäytymistä. Yksinkertaistettuna tarttujan rakenne koostuu sen runkona toimivasta pyöreästä ulkokuoresta, tämän sisällä olevasta moottorista ja rattaista, imukuppia liikuttavasta kiertetytystä tangosta sekä rungon päähän kiinnitetystä liikkuvista leuoista. Moottorin pyörivä liike tuottaa planetaarista vaihteistoa hyödyntäen sekä leukojen liikkeen että imukupin liikkeen sen mukaan, että missä vaiheessa liikerataa tarttuja on. Liikeradan eri vaiheissa erilaiset mekaaniset osat estävät vuorotellen planetaarisen vaihteiston ulko- tai sisäkehän liikkeen, jolloin veto kohdistuu eri paikkaan. Tämän ansiosta tarttuja voi käyttää joko leukoja tai imukuppia tartuntaan, eikä erillisiä ohjattavia lukkoja tarvita. (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023)

Artikkelissa rakennettua tarttujan prototyyppiä testattiin 16 kappaleella, joita yritettiin poimia. Kappaleiden leveydet vaihtelevat 35 - 210 mm välillä ja niiden painot 5 - 3000 g välillä. Testeissä neljän kappaleen poiminta epäonnistui, joiden syyksi artikkelissa annettiin niiden huokoinen pinta, joka haittaa imukupin toimintaa, ja liian suuri leveys leuoilla tarttumiseen. Näitä kappaleita olivat esimerkiksi vaahtomuovi ja tennispallo. Kappaleita, joiden poiminta onnistui, olivat muun muassa suihkupullo, CD-levyn laatikko, kumilevy ja messinkinen paino. Nämä kappaleet nostettiin joko leuoilla, imukupilla tai molempia samanaikaisesti käyttämällä. (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023)

Sähköisellä ohjauksella muotoaan muuttava imukuppi

Zhakypov ym. (2018) ovat kehittäneet imukupin, joka pystyy muuttamaan muotoaan joustavan rakenteensa avulla. Artikkelissa esitellään kehitetyn imukupin pystyvän muotoutumaan kolmeen eri tilaan, joissa sen muoto sopii erilaisille pinnoille. Muodonmuutosta ohjataan muistimetallisilla (eng. shape memory alloy, SMA) elementeillä. Artikkelissa mainitaan SMA-elementtien olevan seosta, joka on puoliksi nikkeliä ja puoliksi titaania. Tämä seos pystyy muuttamaan muotoaan lämpötilan mukaan. Koiri ja Sharma (2021) mukaan SMA-elementit sopivat hyvin pehmeisiin robotteihin, sillä niiden ominaisuuksia voidaan säätää muuttamalla esimerkiksi elementtien pituutta, muotoa, lämpötilaa ja lämmittämiseen käytettävän virran suuruutta. Zhakypov ym. (2018) mukaan erilaiset kappaleiden muodot vaativat erilaisia imukuppien muotoja, joten kehitetyllä imukupilla pyritään vastaamaan tähän tarpeeseen.

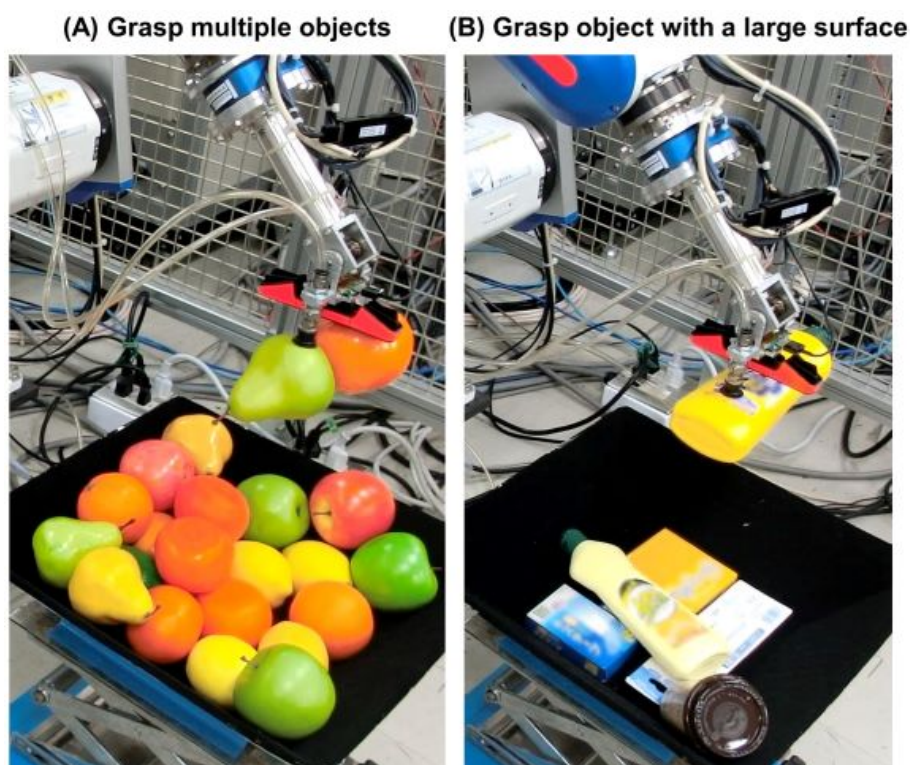


Kuva 2.8. Ohjatusti muotoaan muuttava imukuppi. (Zhakypov ym. 2018, s. 2895, kuva 1)

Kyseisen imukupin rakenne on onton pyramidin mallinen ja se on valmistettu pääasiassa silikonista sekä lasikuidusta kerrostettuna. SMA-elementit on kiinnitetty sen ulko- ja sisäpintoihin siten, että pituuttaan muuttamalla ne samalla muuttavat imukupin muotoa. SMA-elementtejä ohjataan erikseen sähköisesti, jotta niitä pystytään lämmittämään yksittellen halutun muototilan saavuttamiseksi. Eri tilat sopivat esimerkiksi laajaan tasaiseen pintaan, pieneen tasaiseen pintaan, tai kapeaan pyöreään pintaan tarttumiseen. Artikkeleissa on esitelty imukupin pystyvän tarttumaan esimerkiksi 300 g painavaan purkkiin, 9 V paristoon ja kolmiomaisen pahvipakkauksen terävään reunaan. Lisäksi on mainittu, että imukupin nostovoima on 50 kertaa sen oman painon verran. (Zhakypov ym. 2018)

Useiden kappaleiden samanaikainen poiminta useaa imukuppia käyttämällä

Jiang ym. (2023) kehittämässä tarttujassa on käytetty useita kiinteästi asennettuja imukuppeja yhdessä tarttujassa. Tarttujan avulla voidaan poimia useita kappaleita kerralla, tai vaihtoehtoisesti yksi suuri kappale. Tarttujan kehityksen tavoitteena oli parantaa tuotteiden poiminnan tehokkuutta varastoympäristöissä. (Jiang ym. 2023)



Kuva 2.9. Useaa imukupia käyttävä tarttuja. (Jiang ym. 2023, s. 2, kuva 1)

Artikkelin pääasiallinen painoarvo oli konenäköä käyttävän ohjelmiston kehitys. Ohjelmiston tavoitteena oli etsiä tartuntaa varten sopivia pisteitä laatikossa olevista kappaleista, joissa useasta imukupista on hyötyä. Tarttujasta käytetty prototyyppi on yksinkertainen varsi, jonka alapuolelle on kiinnitetty kaksi imukupia tietylle välimatkalle toisistaan. Imukupit ovat molemmat samanlaisia ja ne on asennettu samaan suuntaan. Artikkelissa esitetyissä testeissä poimittiin erilaisia tuotteita prototyyppitarttujalla ja kehitetyllä ohjelmistolla. Tuotteita olivat laatikot, hedelmät, ja päivittäistavarat. Testeissä saatiin tulokseksi 1.16 - 1.65 kertainen nopeutus poimintaan verrattuna yhden imukupin avulla tehtyyn poimintaan. Parhain poimintanopeus saatiin hedelmillä ja huonoin päivittäistavaroilla, mutta jokaisessa testissä kahden imukupin tarttuja oli tehokkaampi. (Jiang ym. 2023)

2.5 Tarttujen anturit

2.5.1 Kappaletta mittaavat anturit

Fantoni ym. (2014) kertovat kolmesta pääasiallisesta parametrasta, joita tartunnassa voidaan valvoa antureilla. Nämä ovat paikallaolo, voima/vääntö ja paikka/orientaatio. Kappaleen paikallaoloon tartunnassa riittää signaali, joka kertoo että onko kappale paikalla vai ei. Esimerkiksi yksinkertainen painokytkin voi toimia tässä tilanteessa. Tämä voidaan

toteuttaa myös kappaleen mahdollista sähkönjohtavuutta käyttämällä, jolloin kappale voi sulkea leukojen välillä olevan piirin ja signaali saadaan tästä. Lisäksi on mahdollista käyttää valokennoa käyttäviä antureita, jotka eivät tarvitse fyysistä kosketusta kappaleeseen. (Fantoni ym. 2014)

Voiman ja/tai väännön tunnistavat anturit sopivat erityisesti kappaleille, joiden tartunnassa täytyy kiinnittää huomiota niihin kohdistettavaan voimaan. Antureilta saatavaa tietoa voidaan syöttää takaisinkytkennällä tartuntaprosessin ohjaukseen, jolloin tartuntaa voidaan säätää tarpeen mukaan. Saadun tiedon perusteella voidaan myös päätellä tartuttavan kappaleen koko tai tyyppi joissakin tapauksissa. Antureita voidaan kiinnittää eri kohtiin tarttujaa riippuen siitä, että mitä niillä halutaan mitata. Tarttujan "ranteeseen" kiinnitetty anturi pystyy mittaamaan tarttujaan kokonaisuutena kohdistettuja voimia, mutta se ei tunnista esimerkiksi kappaleeseen kohdistettua pintapainetta. (Fantoni ym. 2014) Esimerkiksi Lu ym. (2022) kehittämässä tarttujassa on saatu tietoa tarttujan kohdistamasta pintapaineesta kappaleeseen käyttämällä taktiilisia antureita tarttujan sormien pinnoissa. Romeo ym. (2019) tapauksessa on käytetty yksittäistä voima-anturia puristusvoiman tunnistamiseen.

Paikan ja/tai orientaation mittaaminen on tärkeää varsinkin tarkkoja kokoonpanotehtäviä varten. Mittaus voidaan suorittaa monta kertaa, esimerkiksi ennen tartuntaa ja uudestaan juuri ennen kokoonpanotehtävää. Mittaukseen käytetään muun muassa kapasitiivisia ja elektrostaattisia antureita, LED-valokennoja, sekä konenäköä käyttäviä antureita. (Fantoni ym. 2014)

2.5.2 Tarttujan toimintaa mittaavat anturit

SCHUNK SE & Co. KG (2024) esittelee pneumaattista paikoituslaitetta, jonka avulla normaali pneumaattinen tarttuja voidaan muuttaa tarkemmin ohjattavaksi. Pneumaattisen tarttujan leukaan kiinnitetään anturi, joka mittaa leuan lineaarista liikettä. Tämän avulla laite pystyy säätämään tarttujalle tulevaa paineilmaa tarkan liikkeen aikaansaamiseksi. Tuotteen verkkosivulla olevan videon mukaan tarttujaa voidaan tämän jälkeen ohjelmallisesti paikoittaa parhaimmillaan puolen millin tarkkuudella, liikenopeutta voidaan säätää, sekä ilmanpainetta säätämällä tartuntavoimaa voidaan säätää. Paikoituslaite sisältää siis lineaarisen anturin leuan liikkeen mittaamiseen ja anturin tarttujan ilmanpaineen mittaamiseen. (SCHUNK SE & Co. KG 2024)

2.6 Tiedonsiirto laitteiden välillä

Robottiikassa tiedonsiirtoa käytetään esimerkiksi robottien reaaliaikaiseen ohjaukseen, tiedon keräämiseen ja päätöksentekoon (Chuang, M.-H. Yeh ja Y.-L. Yeh 2021). Teollisuudessa ja robotiikassa tarvitaan eri tarkoituksiin erilaisia tiedonsiirtoprotokollia (Tapia ym. 2023). Hercog (2020) määrittelee protokollan olevan kokoelma sääntöjä, jotka määrittelevät miten kahden tai useamman osapuolen tulisi kommunikoida keskenään. Sääntöt määrittelevät esimerkiksi sen, että minkälaisia viestejä voidaan lähettää, milloin viestejä voidaan tai tulee lähettää, sekä näiden viestien tarkat formaatit. Kaikkien toistensa kanssa kommunikoivien osapuolien tulee käyttää samaa protokollaa, jotta ne ymmärtävät toisiaan. Standardisoitujen tai yleisesti käytettyjen protokollien käyttö sallii eri valmistajien tekemien laitteiden toiminnan yhdessä. (Hercog 2020)

Howser (2019, s. 11-12) kertoo kirjassaan OSI-mallista (Open Systems Interchange), joka on teoreettinen malli, jossa laitteiden välinen kommunikointi on jaettu seitsemään kerrokseen. Jokaisella kerroksella on oma numero sekä rooli:

1. Fyysinen kerros (Physical layer) – Hoitaa bittien siirtämisen esimerkiksi sähköjohtoja, valokuitua tai radioaaltoja käyttäen.
2. Siirtoyhteyskerros (Data link layer) – Muodostaa 'kehyksiä' eli kokoelmia bittejä, jotka lähetetään fyysisen kerroksen kautta.
3. Verkkokerros (Network layer) – Hoitaa pakettien lähettämisen eri verkkojen välillä käyttäen esimerkiksi IP-osoitteita.
4. Kuljetuskerros (Transport layer) – Hoitaa muun muassa virreehallintaa ja varmistaa tarvittaessa, että kaikki paketit vastaanotettiin toisen osapuolen toimesta.
5. Istuntokerros (Session layer) – Hoitaa istuntoja, eli huolehtii uusien yhteyksien luomisesta ja ylläpidosta, sekä tarvittaessa lopettaa ne.
6. Esitystapakerros (Presentation layer) – Hoitaa esimerkiksi viestien pakkaamisen/-purkamisen tai salauksen.
7. Sovelluskerros (Application layer) – Ohjaa viestit oikeille sovelluksille. (Howser 2019, s. 11-24)

Teollisessa ympäristössä kaksi ensimmäistä kerrosta ovat kriittisiä, sillä fyysinen kerros on ainut kerros, jossa pystytään fyysisesti siirtämään tietoa osapuolien välillä. Siirtoyhteyskerros, eli toinen kerros, on myös tärkeä, sillä siinä siirrettävä data koostuu kehyksistä eli jonkin protokollan mukaisista kokoelmista bittejä. (Howser 2019, s. 11-24) Näissä kerroksissa käytettävien protokollien valinta riippuu Tapia ym. (2023) mukaan esimerkiksi vaaditusta tiedonsiirtonopeudesta, etäisyydestä, laitteiden lukumäärästä ja ympäristökäyttäjistä.

USB

USB-protokolla (Universal Serial Bus) on suosittu protokolla laitteiden yhdistämiseen tietokoneeseen. Tyypillisessä kokoonpanossa isäntälaitteeseen, eli esimerkiksi tietokoneeseen, on yhdistetty useampia muita laitteita USB-kaapeleiden avulla. USB-kaapelin kautta voidaan syöttää virtaa laitteille, jotka tarvitsevat väylästä virtaa toimiakseen, sekä siirtää tietoa laitteiden välillä. USB-väylän tiedonsiirto perustuu putkiin (eng. pipe), jotka jaetaan kahteen päätyyppiin (Nissim, Yahalom ja Elovici 2017):

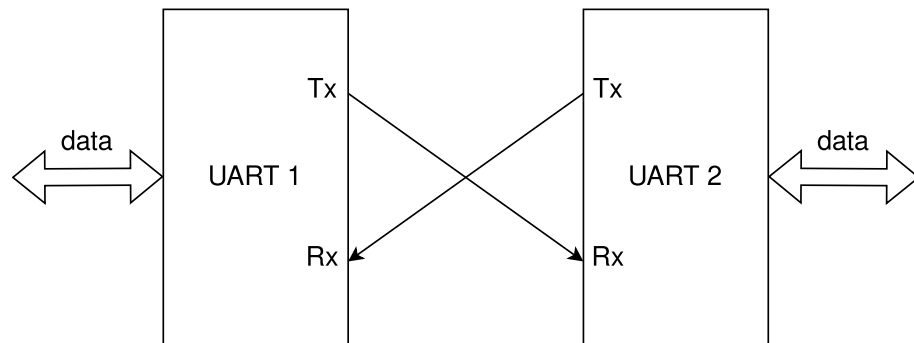
1. Viestiputki (eng. message pipe) – yksinkertaisten ja lyhyiden käskyjen siirtoon isännältä laitteelle ja laitteelta isännälle.
2. Virtausputki (eng. stream pipe) – käytetään tapauksissa, joissa tarvitaan joko tarkkaa ajastusta isännän ja laitteen välillä, pientä viivettä tai suurten datamäärien siirtoa.

Yleisille USB-laitteille on valmiit ajurit useissa käyttöjärjestelmissä, mutta erikoislaitteille voidaan tarvita mukautetut ajurit. Isäntälaitte tunnistaa kytketyn USB-laitteen enumerointiprosessin kautta, jossa laitteen tukema tiedonsiirtonopeus sekä muun muassa malli ja merkki kysytään laitteelta. Isäntälaitte valitsee laitteelle käytetyt ajurit näiden tunnistetietojen perusteella. (Nissim, Yahalom ja Elovici 2017)

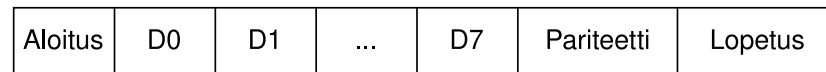
UART

UART eli Universal Asynchronous Receiver and Transmitter on protokolla tiedonsiirtoon kahden laitteen välillä. Nimensä mukaisesti protokolla toimii asynkronisesti, eli laitteiden välillä ei ole erillistä kellosignaalia ajalliseen synkronisointiin. Tämän takia laitteiden välillä tulee olla etukäteen sovittu tiedonsiirtonopeus, jotta laitteet osaavat tulkita niille tulevat viestit. Tiedonsiirto tapahtuu kahden johdon avulla, jotka on kytketty laitteiden välille lähettävien ja vastaanottavien kytkentöjen välille kuvan 2.10 mukaisesti. (Kashyap ja Ravi 2020)

UART-protokollan kytkentä



UART-kehyksen rakenne



Kuva 2.10. UART-tiedonsiirron kytkentä ja kehyksen rakenne. Mukailten Kashyap ja Ravi (2020, kuvat 1 ja 2)

UART-protokollassa tietoa lähetetään kehyksissä, joiden rakenne voi vaihdella. Käytetyn kehyksen rakenne täytyy olla kummankin laitteen tiedossa ennen tiedonsiirtoa. Kehys alkaa aloitusbitillä, jota seuraa viidestä yhdeksään databittiä, vaihtoehtoinen pariteettibitti sekä lopuksi yksi tai kaksi lopetusbittiä. Kehyksen rakenne nähdään kuvan 2.10 alareunassa, jossa laatikot kuvaavat yksittäisiä bittejä. (Kashyap ja Ravi 2020)

3. SUUNNITTELUVAATIMUKSET

Tarttujan suunnitteluvaatimuksia selvitettiin haastattelemalla teollisia leikkeitä valmistavaa yritystä liitteen A kysymyksillä. Kyseessä oleva yritys haluaisi pystyä käsittelemään robotilla ei-ferromagneettisia leikkeitä. Tällä hetkellä vastaavien ferromagneettisten leikkeiden käsittely onnistuu käyttämällä magneettisia tarttujia. Yritys toivoo, että suunnittelussa keskityttäisiin jäykkiin ja itsekantaviin materiaaleihin, joita ovat esimerkiksi kuituvahvisteiset elastomeerit ja ei-ferromagneettiset metallit. Tällöin suljetaan pois esimerkiksi silikonit ja vaahtomaiset materiaalit, jotka ovat taipuisia ja kokoonpuristuvia.

Haastateltavan yrityksen tuotannossa suuremmat sarjakoot ovat pääasiallisesti pieniä leikkeitä. Leikkeiden muodot vaihtelevat niiden käyttökohteesta riippuen, mutta ne voivat olla esimerkiksi pyöreitä tai kantikkaita sekä niissä saattaa olla reikiä ruuvien läpimenoa tai muuta syytä varten. Yrityksen toiveena oli näihin pieniin leikkeisiin keskittyminen tarttujan suunnittelussa, jotta robotin käytöstä leikkeiden käsittelyssä olisi mahdollisimman paljon hyötyä. Pienen leikkeen koko tartuntaa varten voisi olla yrityksen mielestä pienimmillään noin 100 mm, mutta joissakin tapauksissa leike saattaa olla hieman tätä pienempikin. Kyseessä olevien leikkeiden materiaalivahvuudet ovat 1 – 3 mm välillä materiaalista riippuen. Yrityksen mukaan metallisissa leikkeissä saattaa olla hieman vääntymää valmistusprosessin takia, jonka vaikutusta tarttujan toimintaan täytyy arvioida suunnittelussa. Yrityksellä ei ole tiettyjä aikatavoitteita tartunnan suorittamiselle, mutta nopealla tartunnalla tuottavuus on parempi.

Leikkeiden käsittelyssä halutaan haastattelun mukaan välttää tarttumasta leikkeiden mahdollisesti ulkoneviin piirteisiin sekä esimerkiksi reikäpaikkoihin. Tällöin vältytään vaurioittamasta leikkeitä. Suurimmasta osasta käsiteltävistä leikkeistä löytyy suora ja tasainen kohta, josta tartunta voidaan turvallisesti suorittaa.

Yrityksen mukaan ideaalitulanteessa leikkeitä voitaisiin lajitella laatikosta robottia käyttäen siisteihin pinoihin. Todennäköisempi alkutilanne olisi kuitenkin se, että leikkeet olisi jo valmiiksi lajiteltu ja niitä nosteltaisiin robotilla esimerkiksi jollekin jatkokäsittelyvaiheelle automaattisesti. Yrityksen mukaan ensin voitaisiin tutkia, että miten siististä pinosta poimiminen onnistuu ja tämän jälkeen testata vaikeampia tilanteita.

Mitään tiettyä tartuntaperiaatetta ei ollut yrityksen toiveena, mutta leikkeitä tulisi myös mielellään pystyä kääntämään ympäri. Leikkeiden pintaa ei saa lainkaan vaurioittaa, jon-

ka takia yritys toivoo tarttujan olevan materiaaleiltaan suhteellisen pehmeä sekä teräviä kulmia tulisi välttää. Imukupit sekä leuoilla tarttuminen olivat yrityksen mielestä hyviä vaihtoehtoja, sekä useita tartuntaperiaatteita voidaan myös yhdistää vapaasti yhteen tarttujan tarpeen mukaan. Yrityksen toiveena tarttujan suunnitteluun on jokin yksinkertainen ratkaisu ilman kovin monimutkaista mekaniikkaa.

Suunnitteluvaatimusten päättäminen ja yhteenveto

Haastattelusta saatujen vaatimusten perusteella päätettiin tarkat rajat poimittaville leikkeille. Haastattelussa mainittiin poimittavan leikkeen voivan olla pienimmillään hieman alle 100 mm ja leikkeiden olevan pääasiassa pieniä. Tämän johdosta pienimmäksi leikkeen kooksi valittiin 75x75 mm ja suurimmaksi kooksi 250x250 mm. Näin ollen pienin leikkeen koko sopii haastattelun perusteella yrityksen toiveisiin koon alarajasta, sekä yläraja sallii myös suurempien leikkeiden poimimisen, jotta tarttujan käyttökohde ei jää liian suppeaksi. Leikkeiden paksuudeksi valittiin 1 – 3 mm paksut leikkeet, sillä ne sopivat haastattelun yrityksen toiveisiin. Leikkeiden maksimipainoksi rajattiin 100 g, joka sallii jo esimerkiksi melko suurien kuituvahvisteisten tiivisteiden poimimisen. Leikkeiden reunan leveydeksi rajattiin minimissään 13 mm, joka vaikuttaa kirjallisuuskatsauksen perusteella tarpeeksi tukevalta ja sallii tilaa suorittaa tartunta. Päätetyt mitat ja ominaisuudet ovat taulukossa 3.1. Haastattelussa ilmenneet toiveet leikkeiden ominaisuuksista sopivat näiden minimi- ja maksimiarvojen sisään, ja tutkittava leikkeiden alue ei jää liian suppeaksi.

Ominaisuus	minimi	maksimi
Leikkeen koko	75x75 mm	250x250 mm
Paksuus	1 mm	3 mm
Paino	-	100 g
Reunan leveys	13 mm	-

Taulukko 3.1. Leikkeiden vaaditut mitat ja ominaisuudet, joille tarttujan suunnittelu toteutetaan.

4. TARTTUJAN SUUNNITTELU JA PROTOTYYPPI

Suunnittelua ja testausta varten hankittiin lajitelma erilaisia leikkeitä, jotka ovat kuituvahvisteisia pintojen väliin puristettavia tiivisteitä. Nämä tiivisteet sopivat haastatellun yrityksen toiveisiin leikkeiden materiaalista. Alustaviin testeihin valitut tiivisteet ovat esillä kuvassa 4.1. Kyseiset tiivisteet valittiin testeihin, sillä ne kattavat hyvin suunnitteluvaatimusten mukaiset leikkeiden mitat, painot ja muodot. Pieni tiiviste on suhteellisen kevyt ja pienikokoinen, keskisuuri tiiviste on lähellä suunnitteluvaatimusten maksimipainoa sekä kokoa, sekä suuri tiiviste on suurikokoinen ja reunoiltaan ohut. Näin ollen testeissä selvitettiin tartunnan toiminta eri kokoluokille, painoille ja reunojen leveyksille. Eri paksuuksia ei ollut helposti saatavilla kyseisille tiivisteille, joten testeistä ei voida johtaa tarkkoja johtopäätöksiä leikkeiden paksuuden vaikutuksista poimintaan. Suunnitteluvaatimusten mukaiset leikkeiden minimi- ja maksimipaksuudet ovat lähellä valittujen tiivisteiden paksuutta, joten paksuudella ei tulisi olla suurta vaikutusta tarttujan toimintaan.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella varteenotettavia tartuntaperiaatteita leikkeiden poimintaan niiden materiaalien perusteella ovat kitkaan ja muotoon perustuva mekaaninen tarttuminen sekä imutarttuminen. Haastattelun mukaan leikkeitä on suuri määrä eri kokoisia ja muotoisia, joten muotoon perustuva mekaaninen tarttuminen ei vaikuttanut järkevästi toteutettavalta. Eri muodoille tulisi tässä tartuntaperiaatteessa tehdä omat leuat tai jokin muu muotoon perustuva mekanismi, ja leikkeiden ympärille ei välttämättä pääse joka asennossa kokonaan. Tämä jätti jäljelle kitkaan perustuvan mekaanisen tarttumisen sekä imutarttumisen.

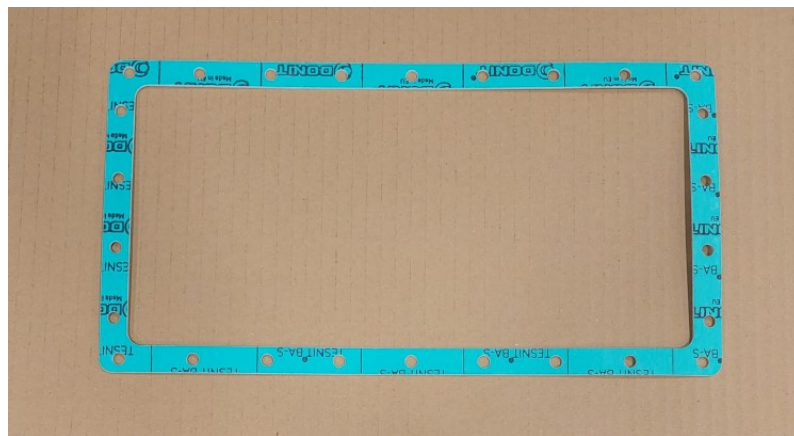
Haastattelussa selvisi, että vastaavien ferromagneettisten leikkeiden käsittelyssä magneettiset tarttijat toimivat hyvin yrityksen tarpeisiin tällä hetkellä. Magneettiset tarttijat pystyvät tarttumaan ferromagneettisiin kappaleisiin yhdeltä puolelta ilman puristavaa otetta. Tämän vuoksi työhön valittiin ensisijaiseksi tartuntaperiaatteeksi imutarttuminen, sillä myös siinä pystytään tarttumaan tasopintaan yhdeltä puolelta ja tämä on jo todettu toimivaksi taktiikaksi. Haastattelun ja teorian mukaan leikkeiden materiaalit kestävät suuriakin puristavia voimia niiden tasopintoihin, joten leuoilla tarttuminen pidettiin työssä mielessä sen varalta, että imutarttuminen yksinään ei toimisi kaikissa tilanteissa.



(a) Pieni tiiviste. Halkaisija 150 mm, pak-
suus 1.5 mm, paino 40 g.



(b) Keskisuuri tiiviste. Koko 210x210 mm,
paksuus 1.5 mm, paino 95 g.



(c) Suuri tiiviste. Koko 363x190 mm, paksuus 1.5 mm, paino 41 g.

Kuva 4.1. Testeihin käytetyt tiivisteet.

4.1 Suunnittelun lähtökohdat ja testit

Leikkeiden reikäkohdista sekä ulkonevista piirteistä tarttuminen on haastattelun mukaan kielletty vaurioiden välttämiseksi, joten käytettäväksi tartuntaperiaatteeksi valittu imutarttuminen tulee suorittaa tasaisilta pinnoilta näitä kohtia välttäen. Imutarttuminen toteutetaan yleisesti imukupeilla, joita on saatavana eri valmistajilta useissa eri muodoissa ja eri materiaaleista valmistettuna. Pyöreistä imukupeista on saatavilla kaikista monipuolisimmin erilaisia malleja ja niiden muodon ansiosta niiden kääntymisellä niiden normaali-vektorin ympäri ei ole merkitystä tartunnan kannalta. Tämän vuoksi tähän työhön valittiin käytettäväksi pyöreät imukupit. Työssä olisi ollut mahdollisuus tutkia myös muun muotoisia imukuppeja, jos olisi selvinnyt, että pyöreät imukupit eivät olisi jostain syystä toimineet tarkoitukseen.

Testejä varten hankittujen tiivisteiden materiaali vastaa tuntumaltaan hyvin kirjallisuuskatsauksen selvitystä kuituvahvisteisten tiivisteiden ominaisuuksista. Tiivisteet ovat tuntumaltaan jäykkiä, eivätkä juurikaan taivu nostettaessa oman painonsa johdosta. Tiivisteitä

mittaamalla selvisi, että pyöreiden imukuppien koko voi olla maksimissaan noin 11 mm, jotta imukuppi sopii jokaiseen tiivisteeseen johonkin sallittuun kohtaan järkevästi. Lisäksi osassa tiivisteissä on tilaa myös suuremmilla imukupeilla tarttumiseen. Tämän perusteella imukuppeja tilattiin kahta eri kokoa testejä varten. Näiden imukuppien tiedot näkyvät taulukossa 4.1.

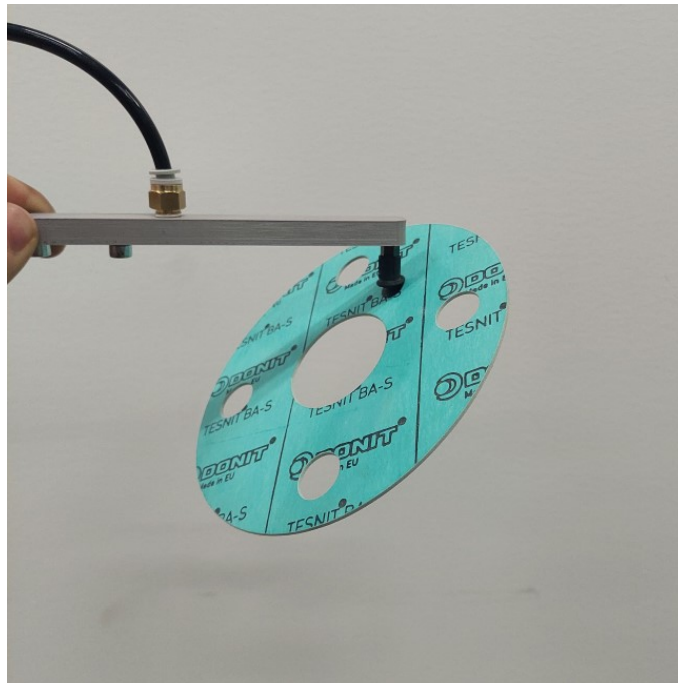
Valmistajan mallimerkintä (Piab)	B10-2	B15-2
Tuotenumero	3150023	3250037
Imukupin muoto	Palje	Palje
Materiaali	Chloroprene (CR)	Chloroprene (CR)
Korkeus	24.9 mm	28.3 mm
Ulkohalkaisija (min)	11 mm	15.7 mm
Liitäntä	M5 kierre	M5 kierre
Pystysuuntainen liike (max)	4.5 mm	6.7 mm
Kaaren säde (min)	4 mm	5 mm
Nostovoima (-20 kPa, pystysuunta)	1.5 N	2.9 N
Nostovoima (-20 kPa, sivusuunta)	1.77 N	1.7 N
Nostovoima (-60 kPa, pystysuunta)	3.4 N	5.9 N
Nostovoima (-60 kPa, sivusuunta)	2.41 N	3.2 N
Nostovoima (-90 kPa, pystysuunta)	4.9 N	8.9 N
Nostovoima (-90 kPa, sivusuunta)	2.82 N	3.8 N
Lämpötilankesto	-40 °C - 110 °C	-40 °C - 110 °C
Kovuus	60° Shore A	50° Shore A

Taulukko 4.1. B10-2 ja B15-2 imukuppien vertailu. Valmistaja Piab.

Taulukon imukupeista halkaisijaltaan 11 mm oleva malli valittiin siten, että se mahtuu jokaisen tiivisteiden pinnalle johonkin sallittuun kohtaan. Toinen imukuppimalli on hieman suurempi, 15.7 mm, jota voidaan käyttää niiden tiivisteiden nostoon, joissa tilaa on reilusti. Suuremman imukupin tartuntavoima on suurempi, jolla voitaisiin mahdollisesti nostaa myös painavampia leikkeitä tai saavuttaa suurempi varmuus tartunnassa ja käsittelyssä. Vielä suurempien imukuppien käyttö olisi ollut mahdollista, jos testeissä olisi selvinnyt näiden imukuppien pitovoiman olevan riittämätön ja leikkeiden pinnoissa olisi ollut tarpeeksi tilaa niille.

Nostotesti yhdellä imukupilla

Suunnittelun hahmottelu aloitettiin testaamalla yksittäisen imukupin käyttämistä testejä varten hankittujen levymäisten tiivisteiden nostamiseen. Tarkoituksena oli saada karkea kuva siitä, että onko hankituilla imukupeilla mahdollisuutta toimia tarkoitukseen. Nostaminen suoritettiin testissä liikuttamalla imukuppi käsin tiivisteeseen pintaan samalla kun imukuppiin oli johdettu alipaine, jonka jälkeen tiiviste yritettiin nostaa sitä käyttämällä. Imukuppi pyrittiin pitämään koko testin ajan vaakatasossa, eli imukupin ei annettu kääntyä tiivisteeseen mukana. Tämä simuloi robottimaista liikerataa, jossa ihmiselle luontaista mukautuvuutta nostettavaan kappaleeseen ei aina ole. Testissä imukupeille käytettävä alipaine saavutettiin käyttämällä alipaine-ejektoria, jolle valmistaja ilmoittaa noin -90 kPa alipaineen tuoton käytetyllä 5 bar paineilmalla. Testi tehtiin käyttämällä pienempiä B10-2 -imukuppeja. Ensimmäinen testi on esitetty kuvassa 4.2.

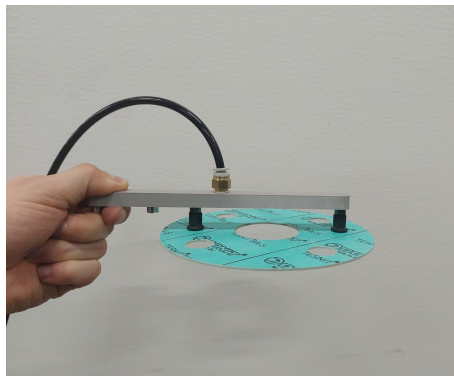


Kuva 4.2. Pienen tiivisteiden nostaminen yhdellä B10-2 -imukupilla.

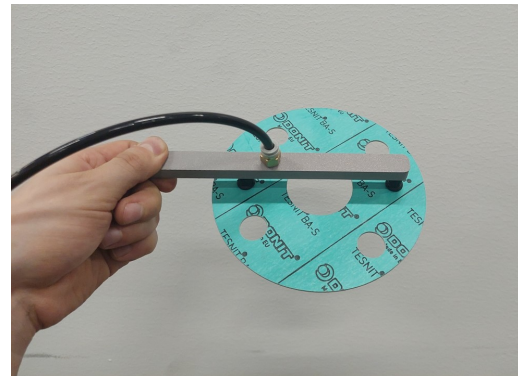
Testissä selvisi, että käytetty imukuppi pystyy nostamaan kuvassa esitetyn pienin tiivisteiden. Keskisuurta ja suurta tiivistettä imukuppi ei kyennyt nostamaan. Tiivisteissä ei ole tarttumapintaa niiden keskellä, josta syntyy käsittelyn kannalta ongelma. Koska tiivisteiden painopiste ei noston aikana sijaitse imukupin alla, tiiviste pyrkii kääntymään ja tiivisteiden tarkasta liikuttelusta tulee hankalaa. Testistä voidaan vetää johtopäätös, että yhden imukupin nostovoima on tarpeeksi pienen tiivisteiden painolle, mutta kiinnitys on silti melko heikko ja tiivisteiden tarkka liikuttelu on vaikeaa. Suurempien ja painavampien tiivisteiden nostaminen yhdellä imukupilla ei onnistunut lainkaan.

Nostotesti kahdella imukupilla

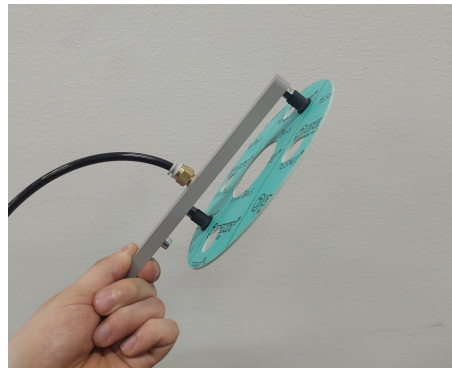
Seuraavaksi testattiin kahta imukuppia samanaikaisesti, jossa tavoitteena oli estää tiivisteiden kääntyminen nostamalla sitä molemmilta puolilta sen massan keskipistettä. Jotta kahta imukuppia voidaan käyttää, imukuppien etäisyys toisistaan täytyy muuttaa kullekin tiivisteelle sopivaksi, sillä niiden muodot ovat erilaisia. Testissä käytettiin tähän tarkoitukseen 3D-tulostettua osaa, jossa toisen imukupin etäisyyttä ensimmäisestä voidaan muuttaa. Molemmat imukupit kiinnittyvät tähän osaan kierteillä. Kummallekin imukupille oli yhteinen alipaineen lähde osan sisäisen kanavan kautta. Pienen tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla on esitetty kuvassa 4.3, keski-suuren nostaminen kuvassa 4.4 ja suuren kuvassa 4.5.



(a) Nosto vaakatasossa.

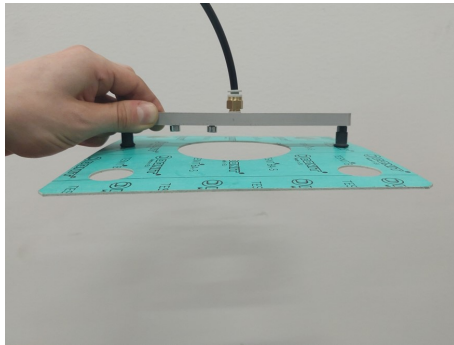


(b) Nosto vinossa.

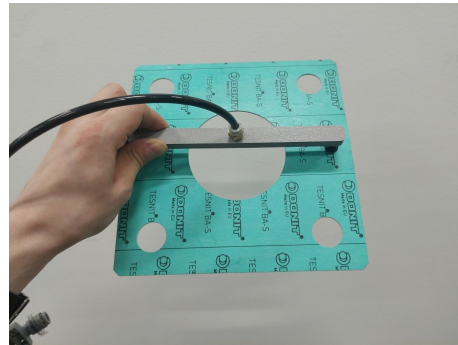


(c) Nosto vinossa.

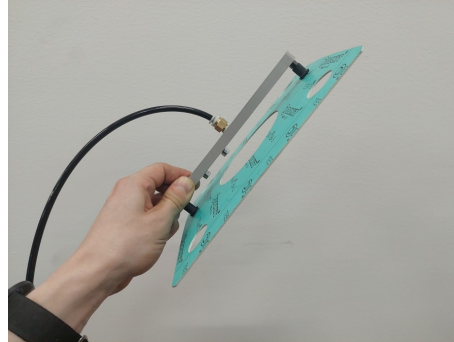
Kuva 4.3. Pienen tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.



(a) Nosto vaakatasossa.

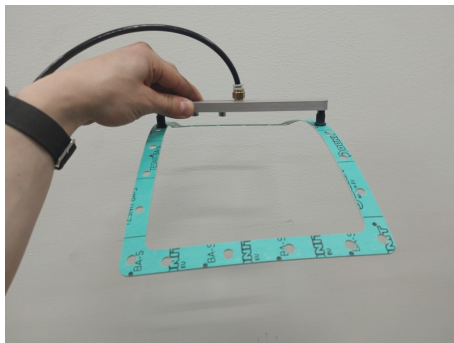


(b) Nosto vinossa.

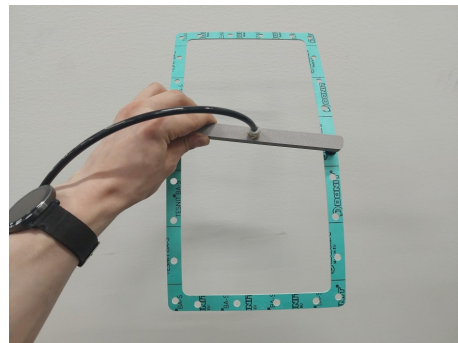


(c) Nosto vinossa.

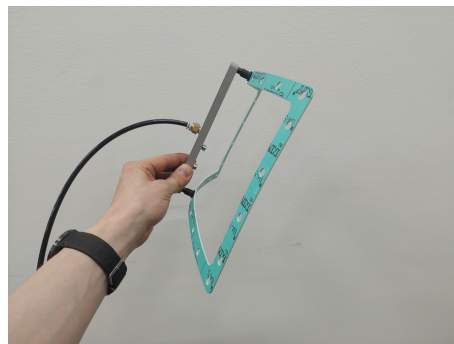
Kuva 4.4. Keskiuuren tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.



(a) Nosto vaakatasossa.



(b) Nosto vinossa.



(c) Nosto vinossa.

Kuva 4.5. Suuren tiivisteiden nostaminen kahdella imukupilla.

Kuten kuvista nähdään, tiivisteet pysyivät kahdella imukupilla paljon paremmin kiinni, se-

kä niitä pystyttiin kääntämään haluttuun kulmaan. Tämä helpottaa huomattavasti tarttujan käyttämistä robotilla, sillä leikkeiden tukevampi kiinnitys vähentää epävarmuutta niiden käsittelyn aikana. Kahden imukupin käytön todettiin olevan riittävän hyvä tämällytyypisten leikkeiden poimintaan, sillä leikkeet pysyivät tukevan oloisesti kiinni imukupeissa ja niiden kääntäminen onnistui hyvin. Kolmen tai useamman imukupin käyttäminen tarttumiseen voisi olla toimiva vaihtoehto esimerkiksi silloin, jos kahdella imukupilla ei jostain syystä pystyisi tarttumaan järkevästi leikkeen painopisteen molemmin puolin. Vaihtoehtoisesti jos leikkeen materiaali olisi todella pehmeää, niin useammalla imukupilla voitaisiin kasvattaa tartunnan pinta-alaa sekä tukea leikkettä useammasta kohdasta sen taipumisen välttämiseksi. Imukuppien määrän lisääminen tulisi monimutkaistamaan kehitettävän tarttujan rakennetta ja mahdollisesti sen käyttöä, joten kolmen tai useamman imukupin käyttämistä vältettiin kun sille ei ollut suoraa tarvetta.

4.2 Tarttujan liikemekanismin valinta

Kahden imukupin käyttäminen todettiin testeissä toimivaksi tekniikaksi, joten tämän pohjalta vietiin eteenpäin ideaa tarttujasta, jossa kahden imukupin etäisyyttä toisistaan voidaan muuttaa. Etäisyyden muuttaminen on välttämätön ominaisuus tarttujan toiminnan kannalta, sillä tällöin tarttuja pystytään asettamaan poimittavien leikkeiden muodon perusteella toimivaan asentoon. Etäisyyden muuttamisen mahdollistavaan rakenteeseen ja mekanismiin selvitettiin mahdollisia vaihtoehtoja ja tämän jälkeen näistä valittiin sopivin.

Selvityksessä tarkasteltiin kirjallisuuskatsauksessa osioissa 2.4 ja 2.5 löydettyjä erilaisia kehitettyjä tarttujia ja mekanismeja ja etsimällä niistä samankaltaisuuksia tässä työssä kehitettävään tarttujaan. Löydetyistä liikemekanismeista nousivat esiin askelmoottorilla ohjattu ruuvitoiminen mekanismi (Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja 2023), sekä paineilmatoiminen antureilta tulevan palautteen perusteella ohjattava sylinteri (SCHUNK SE & Co. KG 2024), sillä ne vaikuttivat sopivimmilta vaihtoehdoilta ja toimivat kyseisissä muissa tarttujissa. Työssä suunniteltava tarttuja tarvitsee suhteellisen tarkan säädön kahden imukupin väliselle etäisyydelle, joten esimerkiksi kappaleen muotoon mukautuvat mekanismit eivät vaikuttaneet sopivilta.

Ruuvitoiminen mekanismi voi olla lineaarinen ruuvimekanismi kuten Courchesne, Cardou ja Rachide Onadja (2023) tapauksessa, tai kierukkavaihteen kaltainen mekanismi, jossa ruuvi tuottaa kiertyvän liikkeen. Lineaarisen liikkeen tuottavat mekanismit liikuttavat yleensä yhtä tai kahta leukaa tai vartta lineaarisesti, ja kierukkavaihteella toimivaan mekanismiin voidaan kiinnittää esimerkiksi kääntyvä varsi. Seuraavaksi on esitetty arvioitavien mekanismien vertailu.

Ruuvitoiminen lineaarinen mekanismi

Tarttujan suunnittelussa kiinnostavat seuraavat liikemekanismin ominaisuudet: liikkeen tarkkuus, mekanismia käyttävän tarttujan koko suhteessa sen liikealueeseen, sekä mekanismin yksinkertaisuus, valmistettavuus tai vaihtoehtoisesti hinta. Ruuvitoimisessa lineaarisessa mekanismissa liikkeen tarkkuus on hyvä, sillä ruuvissa on yleensä vain pieni välyys ja askelmoottorilla voidaan saavuttaa hyvä tarkkuus ruuvin kääntökulmaan. Tällä mekanismilla toteutetun tarttujan pituus on suhteellisen suuri lineaarisen liikkeen suuntaan, sillä ruuvi ja mekanismin runko vaativat tilaa, mutta leveys voi olla suhteellisen pieni. Mekanismi on suhteellisen yksinkertainen ja halpa toteuttaa.

Ruuvitoiminen kierukkavaihte

Ruuvitoimisessa kierukkavaihteessa on hyvä liikkeen tarkkuus, jos vaihteeseen kiinnitetty kääntyvä varsi on kohtuullisen pituinen. Tätä mekanismia käyttävän tarttujan koko on suhteellisen pieni sen liikealueeseen verrattuna, sillä vaihteeseen kiinnitettävä varsi voi olla tarvittaessa myös suhteellisen pitkä, jolloin sen kääntymisellä saadaan suuri liikealue. Mekanismi on yksinkertainen ja suhteellisen halpa valmistaa.

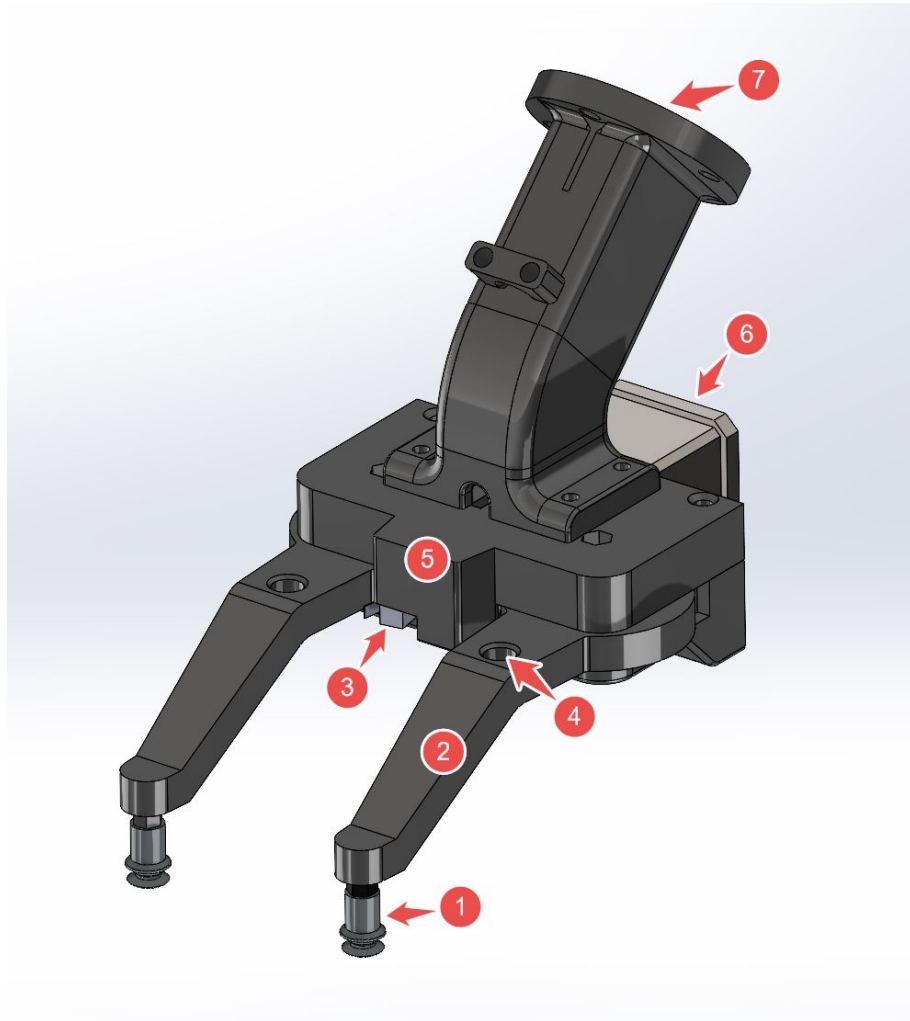
Paineilmatoiminen ohjattava sylinteri

Paineilmatoimisessa venttiileillä ja antureilla ohjatussa sylinterissä on kohtuullinen paikointitarkkuus. Kuten ruuvitoimisessa lineaarisessa mekanismissa, myös tällä mekanismilla toteutetun tarttujan pituus on suhteellisen suuri lineaarisen liikkeen suuntaan, sillä sylinteri ja tarttujan runko vaativat tilaa, mutta leveys voi olla suhteellisen pieni. Mekanismi on suhteellisen yksinkertainen, mutta sen ohjaus ei ole kovin helppo toteuttaa itse.

Näistä mekanismeista valittiin varsinaiseen tarttujaan ruuvitoiminen kierukkavaihte. Kierukkavaihdetta päätettiin käyttää, sillä sen avulla saavutetaan suuri liikealue suhteessa mekanismin kokoon, sen liiketarkkuus on riittävällä tasolla, sekä sen rakentaminen on suhteellisen yksinkertaista.

4.3 Suunniteltu tarttuja

Kuvassa 4.6 on esitetty tarttujan malli, joka suunniteltiin käyttämällä valittua kierukkavaihdetta liikemekanismina. Kierukkavaihte toteutettiin kaksipuolisena, jossa yksi ruuvi kääntää kahta vartta samanaikaisesti. Konseptin toimivuutta testattiin ennen lopullista suunnittelua yksinkertaisella 3D-tulostetulla prototyypillä, jossa yksittäistä vartta käännettiin vastaavalla tavalla ruuvin avulla. Prototyyppi toimi odotetulla tavalla, eli varren kääntyminen saavutettiin ruuvia kääntämällä. Kuvassa esitetyn mallin suunnittelu suoritettiin konseptin toimivuuden varmistuttua.

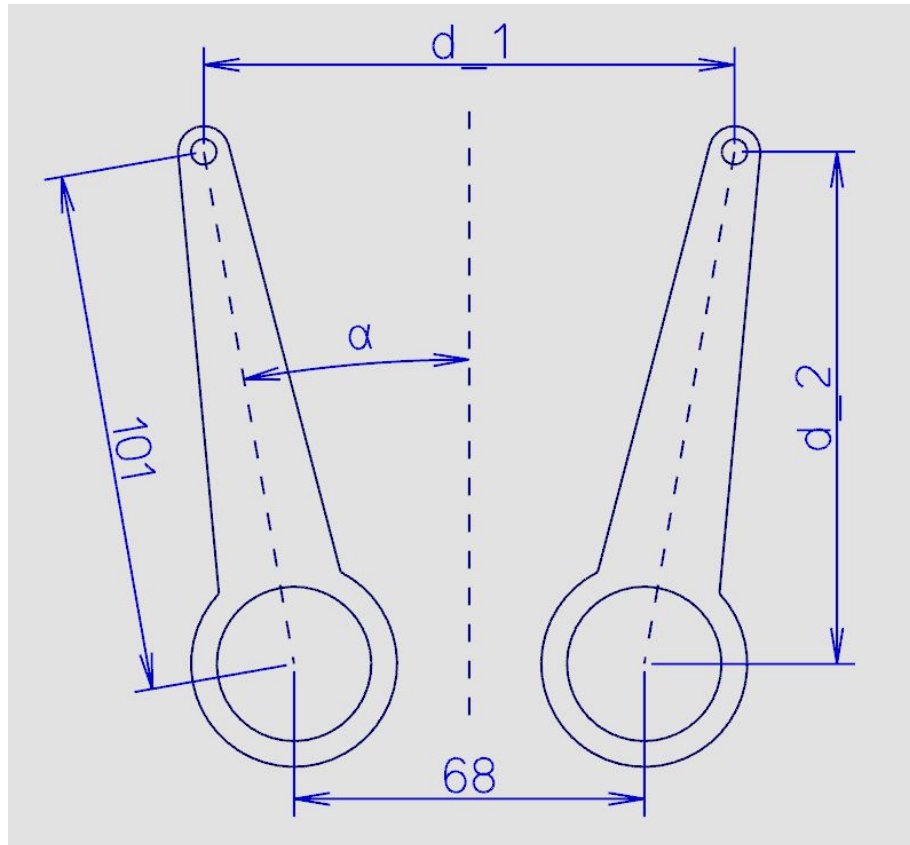


Kuva 4.6. Kehitetyn tarttujan malli Solidworks-ohjelmassa.

Kuvasta 4.6 nähdään suunnitellun tarttujan eri osat, jotka on merkitty numeroilla. Numero (1) on toinen imukupeista, tässä tapauksessa malli *B10-2*. Numero (2) on toinen varsista, joiden päässä imukupit sijaitsevat. Varret pystyvät kääntymään tarttujassa rungon, kuvassa numero (5), sisällä olevien laakereiden ja mekanismin avulla. Numero (3) on vipukytin, jonka avulla tarttujan tarkka kulma saadaan selvitettyä ennen ensimmäistä tartuntaa. Kääntyvä varsi liikutetaan sitä päin, jolloin kytkimen sulkeutuminen ilmoittaa varren sijainnin. Numero (4) on toinen varsissa sijaitsevista porteista, joiden kautta alipaine johdetaan imukupeille. Numero (6) on tarttujan takana sijaitseva askelmoottori, joka tuottaa varsia kääntävälle mekanismille tarkan liikkeen. Numero (7) on kiinnityspinta tarttujan robottiin kiinnittämistä varten. Kiinnityspinta on mitoitettu Universal Robots UR5 -robottia varten, jota käytetään tarttujan testeissä. UR5-robotissa käytettävä kiinnityspinta on ISO 9409-1-50-4-M6 mukainen (Han ym. 2024).

Tarttuja perustuu siis kahteen varseen, jotka on kiinnitetty tarttujan runko-osaan. Varsien toinen pää on laakeroitu, jolloin ne pystyvät kääntymään, ja toisessa päässä varsia sijaitsevat imukupit. Varsien kääntyessä niiden päissä olevien imukuppien etäisyys toisistaan

muuttuu kääntökulman funktiona, jolloin imukuppien etäisyyttä voidaan robotista ohjaamalla säätää käytännössä portaattomasti. Tarttujan suunniteltu liikealue imukuppien keskiöiden välisenä etäisyytenä mitattuna on 20 mm - 270 mm. 20 mm etäisyydellä varsien päät melkein koskettavat toisiaan, ja 270 mm etäisyydellä varret osoittavat suoraan tarttujan sivuille, eli niiden välinen kulma on 180° .



Kuva 4.7. Tarttujan geometria yläpuolelta katsottuna.

Tarttujan käyttöä varten varsien tarvittava kääntökulma halutulle imukuppien etäisyydelle täytyy olla laskettavissa. Kuvassa 4.7 nähdään yksinkertaistettuna tarttujan geometria, jossa on mitoitettuna tarvittavat etäisyydet ja pituudet. Laakeroitujen päiden välinen etäisyys on suunnitellussa tarttujassa 68 mm, sekä varsien pituudet ovat 101 mm. Näillä tiedoilla voidaan laskea kulmasta α seuraava imukuppien välinen etäisyys, joka on

$$d_1 = 2 \cdot (34 + \sin(\alpha) \cdot 101). \quad (4.1)$$

Yleisessä muodossa yhtälö on

$$d_1 = 2 \cdot \left(\frac{d_l}{2} + \sin(\alpha) \cdot d_v \right), \quad (4.2)$$

jossa d_l on laakerien välinen etäisyys ja d_v varren pituus. Tätä voidaan käyttää, jos tarttujan varret halutaan jossain kohtaa vaihtaa toisen pituisiin tai tarttujan geometriaa halutaan muuttaa.

Yhtälöstä 4.1 voidaan johtaa käänteinen yhtälö, josta saadaan tarvittava kulma α , kun haluttu etäisyys d_1 on tiedossa:

$$\alpha = -\arcsin\left(\frac{68 - d_1}{202}\right). \quad (4.3)$$

Tämän yhtälön vastaava yleinen muoto on

$$\alpha = -\arcsin\left(\frac{d_l - d_1}{2 \cdot d_v}\right). \quad (4.4)$$

Kummatkin yhtälöt tarkastettiin antavan odotetut arvot CAD-ohjelmalla piirtämällä ja vertaamalla tuloksia. Yhtälö 4.3 toimii ainoastaan tarttujan mahdollisella liikealueella, eli maksimissaan imukuppien ollessa 270 mm etäisyydellä toisistaan, jolloin varret osoittavat suoraan molemmille sivuille. Negatiivisilla arvoilla yhtälö toimii oikein -134 mm asti, mutta fyysisesti tarttuja ei koskaan voi liikkua tällaiseen asentoon, sillä varret törmäävät toisiinsa. Robotin ohjauksen kannalta myös etäisyyden d_2 laskeminen on hyödyllistä, jotta imukupit saadaan liikutettua oikeaan kohtaan leikettä. Tämä voidaan laskea, kun varsien kulma tiedetään:

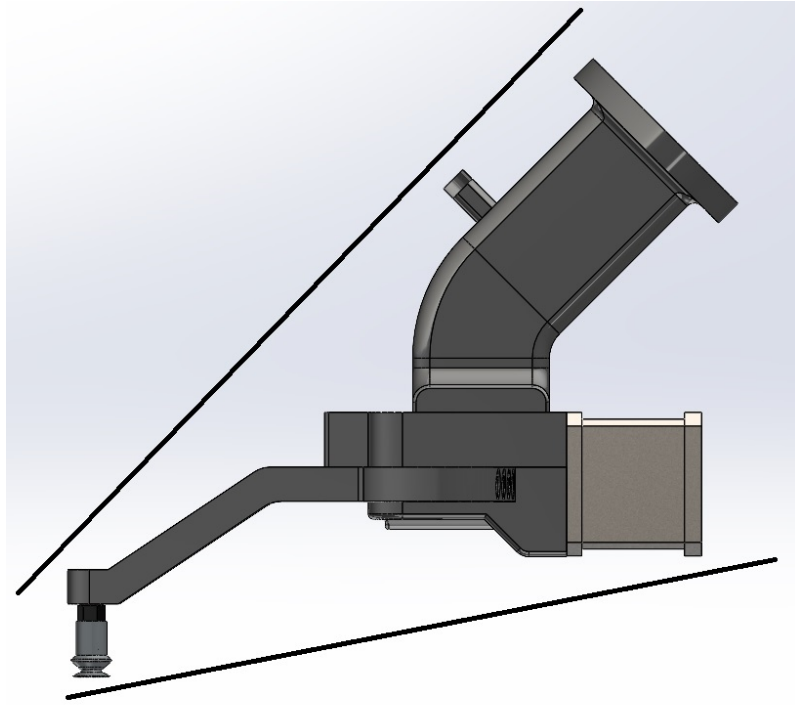
$$d_2 = 101 \cdot \cos(\alpha). \quad (4.5)$$

Yleisessä muodossa yhtälö on

$$d_2 = d_v \cdot \cos(\alpha). \quad (4.6)$$

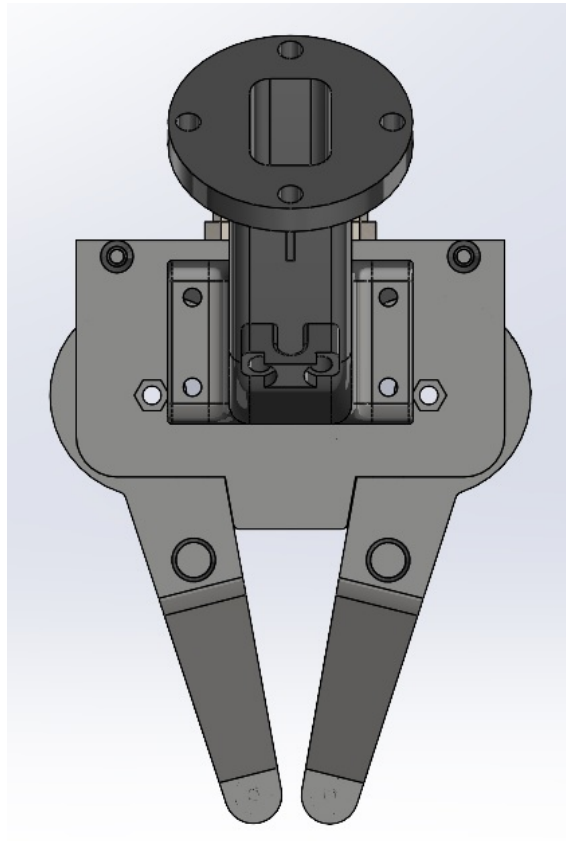
4.3.1 Tarttujan muoto

Tarttujan muoto suunniteltiin siten, että tarttuja mahtuu mahdollisimman hyvin lähelle muita pintoja. Kuvassa 4.8 on esitetty suunnitellun tarttujan sivuprofiili sekä kaksi havainnollistavaa viivaa, joiden sisään tarttuja on karkeasti suunniteltu mahtumaan.

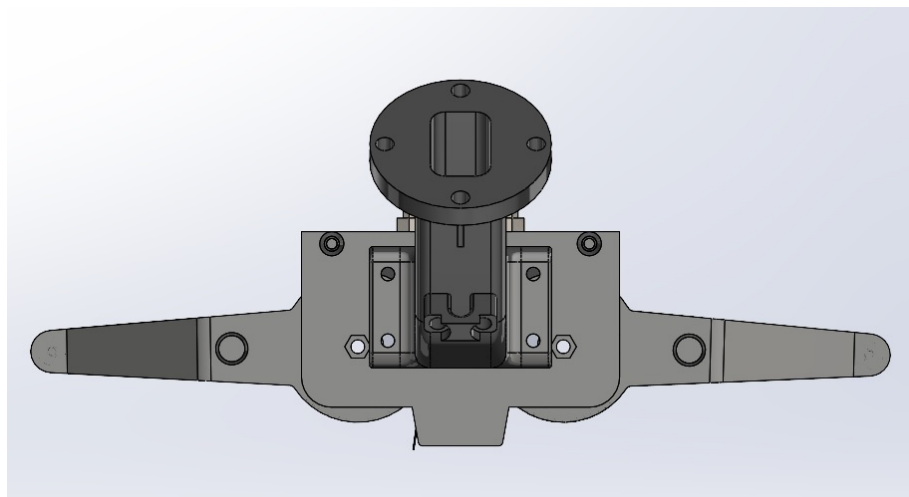


Kuva 4.8. Tarttujan muodon sivunäkymä.

Tarttujan muotoilu sallii näin ollen sen mahtumisen esimerkiksi lähelle muita nostettavia leikkeitä tai muiden tartunnan esteenä olevien pintojen lähelle. Tarttujan kiinnityspinta robottiin kiinnittämistä varten on myös suunnattu tämän takia 45° kulmaan, jotta tarttujan profiili on tässä suunnassa mahdollisimman kapea. Tampereen Yliopistossa tutkimusassistenttina toimiva Long Phan teki tarttujan käytöstä simulaation, joka myös tukee kiinnityspinnan suuntaamista tähän kulmaan. Valittu kulma mahdollistaa simulaation mukaan tarttujan helpomman käytön robotilta vaadittujen liikekulmien kannalta yleisissä liikkeissä.



Kuva 4.9. Tarttujan muoto päältä varsien ollessa kiinni.

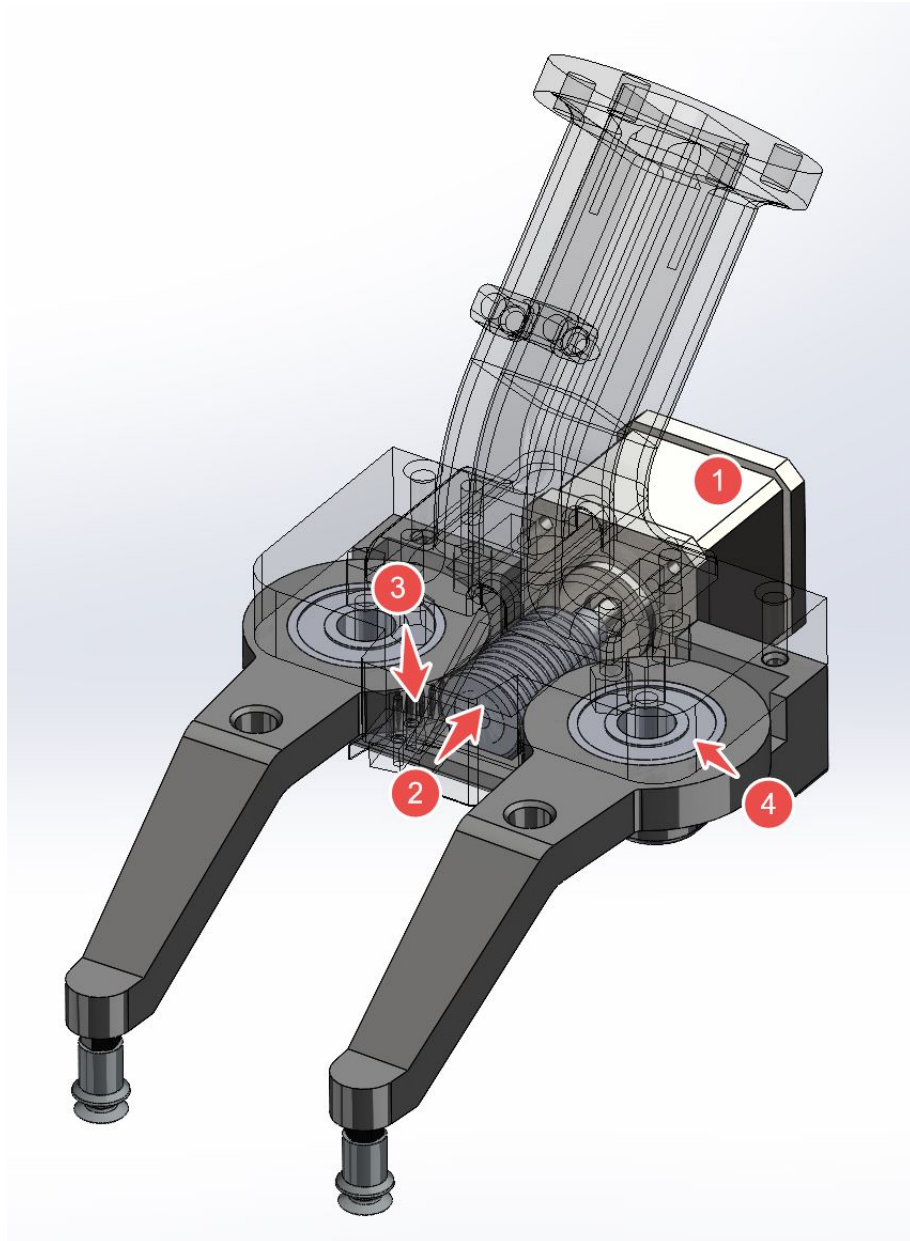


Kuva 4.10. Tarttujan muoto päältä varsien ollessa auki.

Kuvista 4.9 ja 4.10 nähdään tarttujan profiili päältäpäin, kun tarttujan varret ovat mahdollisimman lähellä toisiaan ja vastaavasti kun varret ovat mahdollisimman auki. Varsien ollessa lähellä toisiaan tarttujan profiili on melko kapea, jolloin se voisi mahtua esimerkiksi laatikon nurkkaan tai vastaavaan paikkaan tekemään poiminnan. Varsien ollessa auki tarttujan profiili on melko kapea toiseen suuntaan. Näiden kahden asennon välillä

tarttujan profiili on kohtuullisen pieni, sillä suurimmassa osassa mahdollisia asentoja imu-
kupprien välinen etäisyys on suurempi kuin tarttujan rungon leveys, joten tarttujan rungon
koon ei tulisi olla tartunnan esteenä.

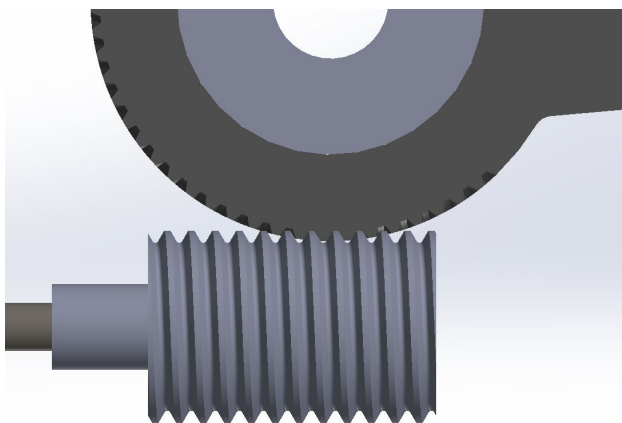
4.3.2 Liikemekanismi



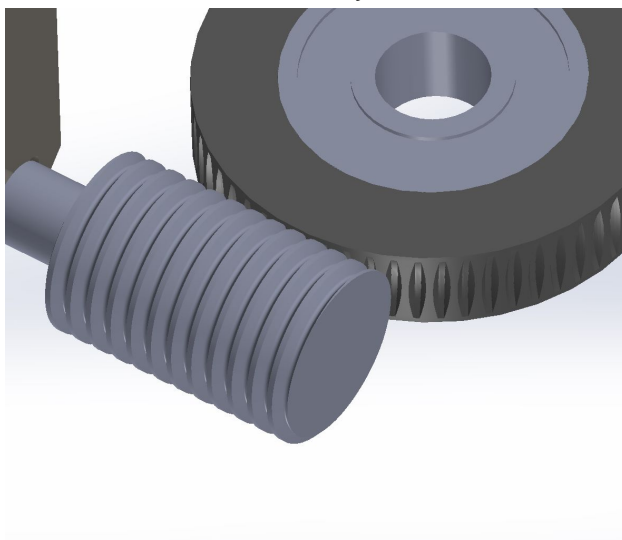
Kuva 4.11. Tarttujan liikemekanismin yleiskuva.

Tarttujan varsien kääntyvä liike saavutetaan käyttämällä kierukkavaihteen kaltaista me-
kanismia, joka näkyy kuvassa 4.11. Tarttujaan kiinnitetty askelmoottori, kuvassa numero
(1), pyörittää kierreruuvia, joka on kuvassa numero (2). Varsiin on mallinnettu kierreru-

viin sopiva hammastus, jonka ansiosta kierreruuvin kääntyminen kääntää varsia samanaikaisesti. Varsien hammastus on esitetty kuvan kohdassa (3). Varret kääntyvät kuvassa näkyvien laakerien (4) ympäri. Kuvassa 4.12 on tarkemmin esitetty kierreruuvin sekä varsien vastaavan hammastuksen geometriaa Solidworks-ohjelmassa. Tämä mekanismi valittiin, sillä se sallii suhteellisen tarkan kääntökulman säädön, sekä kierreruuviin valitun nousun (kierteen harjan huippujen välisen etäisyyden) takia mekanismi ei ole takaisin ajettava. Takaisinpäin ajettavuudella (eng. back drivable) tarkoitetaan tässä sitä, että varsia kääntämällä ei ole mahdollista pyörittää kierreruuvia, sillä mekanismin sisäinen kitka estää sen. Varsien kulman säätö on tarkoitus tehdä vain silloin, kun tarttujassa ei ole kiinni nostettavaa kappaletta. Tällöin kierreruuvin pyörittämiseen riittää pienikokoinen askelmoottori, koska varsissa ei ole ulkoista vastusta liikkeen aikana, sekä varsien kulman paikallaan pitäminen käytön aikana tapahtuu mekanismin ominaisuuksista johtuen itsestään.



(a) Kierreruuvi ja varsi sivuprofilissa. Varsi kuvassa leikattuna hammastuksen näkymiseksi.

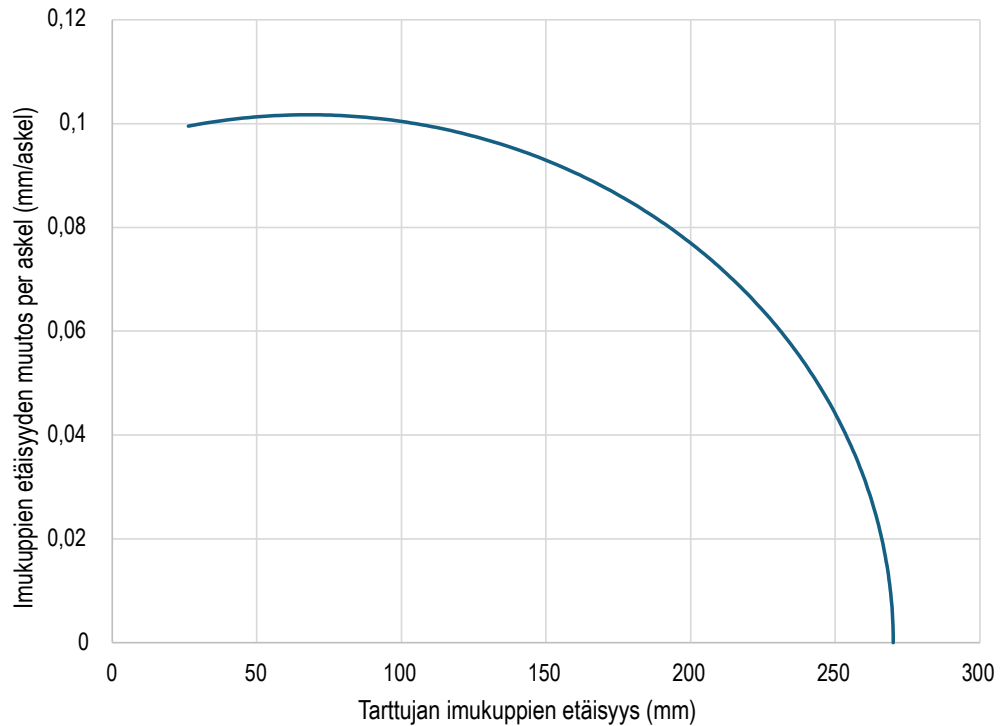


(b) Kierreruuvi ja varsi yleiskuva.

Kuva 4.12. Kierreruuvi ja varren hammastus.

Kierreruuvien kierre on M20x2.5, jonka koko valittiin varren hammastuksen 3D-tulostuksen perusteella. Yleisen FDM-tekniikkaa (Fused Deposition Modeling) käyttävän 3D-tulostimen on vaikeaa tehdä pieniä yksityiskohtia tarkasti, joten suhteellisen suuren kierteen valitseminen helpottaa prototyypin valmistusta. Tämän kierrekoon todettiin onnistuvan hyvin tarttujan prototyypin 3D-tulostuksessa. Varsiin tuleva hammastus haluttiin mallintaa mahdollisimman hyvin kierreruuvien profiiliin sopivaksi, jotta osien välinen välitys olisi mahdollisimman pieni. Mahdollisimman pieni välitys mahdollistaa varsien tarkan liikkeen ja oikeanlaisella hammastuksen profiililla mekanismin toiminta on tasaista koko kääntöalueen matkalla. Tämän vuoksi varren hammastus mallinnettiin Solidworks-ohjelmalla käyttäen tätä työtä varten kirjoitettua scriptiä, joka mallintaa kierukkavaihteen liikettä pienissä askeleissa ja suorittaa samalla sarjan boolean-operaatioita, jotka leikkaavat kierukkavaihteen liikkeen aikana liikkeeseen sopivan hammastuksen varsiin. Jokaisella askeleella kierreruuvien mallia käytettiin varren hammastuksen leikkaamiseen, jolloin leikkauksien tuloksena syntyi varteen hammasprofiili, joka sopii juuri tälle kierreruuvien muodolle. Samaa mallinnustekniikkaa käyttämällä voitaisiin tehdä myös erilaisille kierreprofiileille sopivia hammastuksia.

Valmiin hammastuksen hampaiden välinen kulma on noin 5.77° varren kääntöakselista mitattuna. Tällöin kierreruuvien ja samalla askelmoottorin yhden kierroksen suuruinen pyörittäminen aiheuttaa tämän kulman suuruisen kääntymisen tarttujan varressa. Tarttujan askelmoottorin ohjauksessa ei ole käytetty osittaisaskellusta (eng. microstepping). Käytetyssä askelmoottorissa on 200 askelta/kierros, josta voidaan laskea askelluksesta johtuva imukuppien välisen etäisyyden paikoitusepäätarkkuus tarttujalle, jos muita mekaanisia epätarkkuuksia ei oteta huomioon.



Kuva 4.13. Imukuppien etäisyyden muutos per askelmoottorin askel.

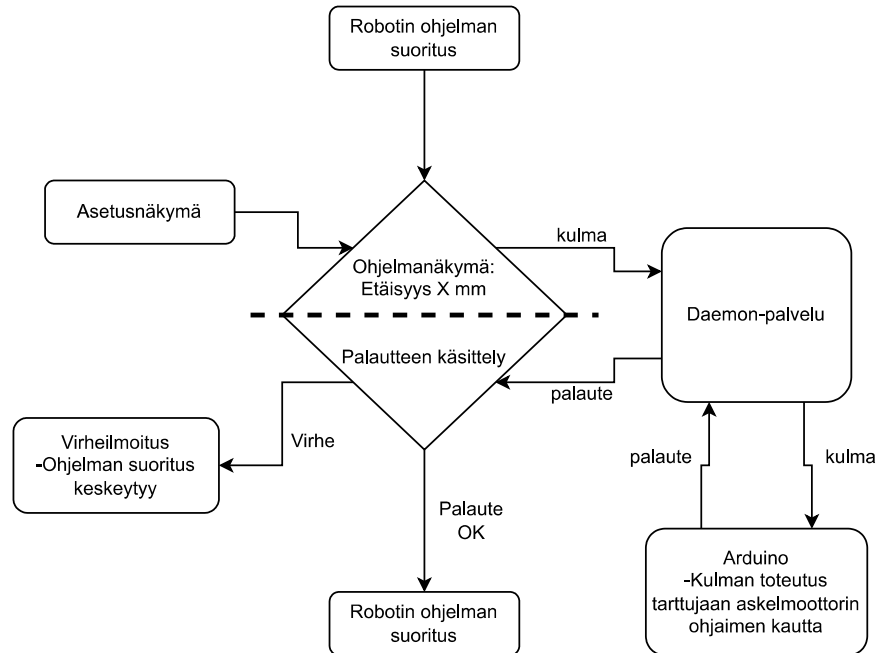
Kuvaajassa 4.13 on esitetty askelmoottorin yhden askeleen etenemisen vaikutus tarttujan imukuppien väliseen etäisyyteen kussakin tarttujan liikealueen asennossa. Askelmoottorin askellus johtaa suurimpaan imukuppien etäisyyden muutokseen 68 mm:n asennossa, jossa tarttujan molemmat varret osoittavat suoraan eteenpäin. Tällöin tässä asennossa paikoitustarkkuus on heikoin. Koska imukuppien etäisyys voidaan asettaa lähimpään askeleeseen tavoiteasennon jommalle kummalle puolelle, niin teoreettinen maksimivirhe on puolet askeleesta eli noin 0.05 mm. Todellisessa tarttujassa on pieni välys kierreruuvien ja varsien hammastuksen välillä, joten tähän tarkkuuteen ei reaalityönteossa päästä.

4.3.3 Ohjaus robotista

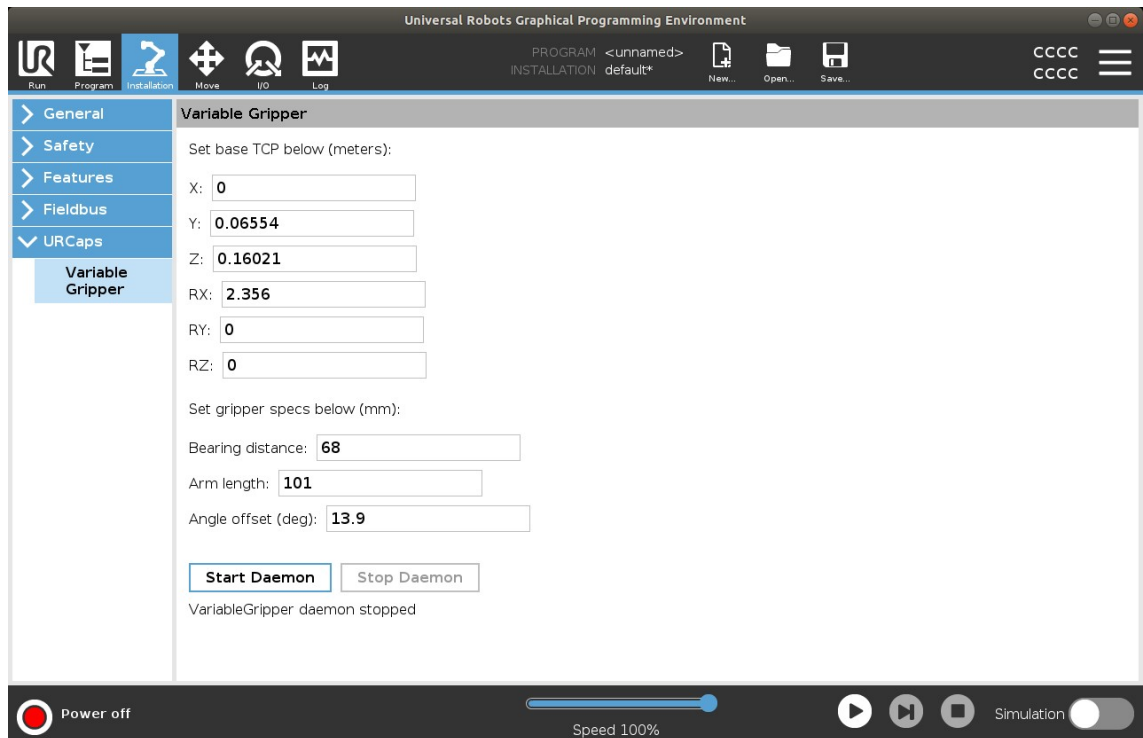
Ohjelmisto

Tarttujan ohjaus robotista suunniteltiin toimimaan Universal Robots UR5 -robotin kanssa, sillä tarttujan testaus toteutettiin tällä mallilla, mutta samat periaatteet todennäköisesti toimivat myös muilla roboteilla. Robotin ohjaimelle ohjelmoitiin URCaps-laajennus, joka mahdollistaa oman ohjelmakoodin suorittamisen UR5-robotin ohjaimessa (Universal Robots 2022). Laajennus on kirjoitettu Java-ohjelmointikielellä käyttäen pohjana Universal Robotsin tarjoamaa URCaps SDK:ta (Software Development Kit). Laajennuksen avulla tarttujan ohjaukseen käytettävät asiat integroitiin robotin ohjaimen graafiseen käyttöliittymään ja osaksi robotin normaalia toiminnan ohjelmointia. Laajennusosa toteuttaa tarttu-

jan käyttöä varten asetuskäytön, ohjelmanäkymän, sekä laajennusosan taustalla pyörivän daemon-prosessin. Näiden toiminta osana robotin ohjelmointia nähdään kuvassa 4.14.



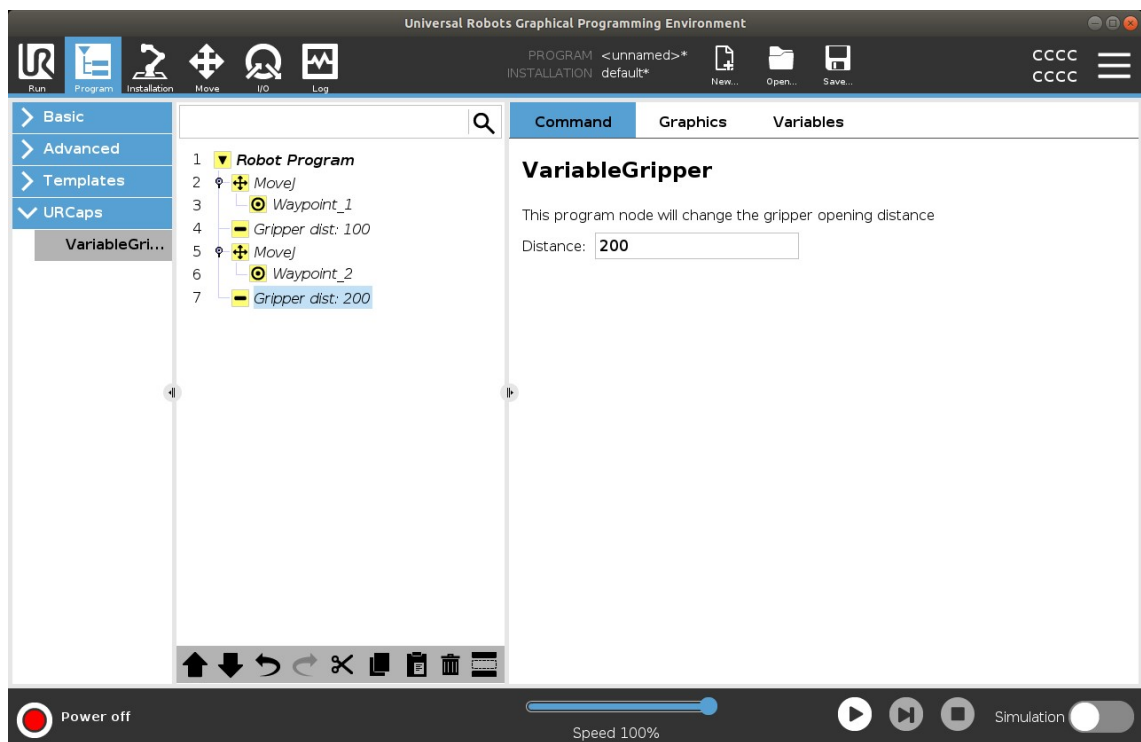
Kuva 4.14. Tarttujaan ohjauksen rakenne.



Kuva 4.15. URCaps-laajennuksen asetuskäytön.

Asetuskäytössä (kuva 4.15) asetetaan kahdenlaiset parametrit tarttujaan käyttöä var-

ten: tarttujan sijainti ja kääntökulma suhteessa robotin kiinnityslaippaan, sekä tarttujan ohjaukseen tarvittavat parametrit, jotka ovat kääntyvien varsien pituus, laakereiden välinen etäisyys, sekä kääntökulman kalibrointiin käytettävä siirtokulma. Tarttujan sijaintia ja kääntökulmaa suhteessa robotin laippaan käytetään, kun tarttujan imukupit halutaan liikuttaa tiettyyn kohtaan avaruudessa. Tästä on kerrottu lisää osiossa 4.3.4. Kaikki asetetut parametrit tallentuvat laajennuksen muistiin, jossa ne säilyvät asetuksen jälkeen robotin käynnistyskertojen välillä. Asetusnäkyvän kautta myös käynnistetään ja tarvittaessa pysäytetään laajennuksen taustalla toimiva daemon-prosessi, jonka täytyy olla käynnistettynä, jotta tarttuja voi vastaanottaa sille tarkoitetut käskyt.



Kuva 4.16. URCaps-laajennuksen ohjelmanäkymä.

Ohjelmanäkymä (kuva 4.16) näkyy silloin, kun tarttujan imukuppien etäisyyden säätö asetetaan johonkin kohtaan osaksi robotin ohjelmaa. Tässä näkymässä päätetään kyseisessä robotin ohjelman kohdassa haluttu tarttujan imukuppien etäisyys. Robotin ohjelman suorituksen aikana tämän näkymän ohjelmointi tuottaa robotille suoritettavan URScript-koodin, jonka robotin ohjain suorittaa ja näin ollen osaa ohjata tarttujan imukupit halutulle etäisyydelle daemon-prosessin kautta. Ohjelmanäkymä käyttää tämän koodin luomisessa sille annettua haluttua imukuppien etäisyyttä, sekä lukee asetusnäkyvään asetettujen parametrien arvot tarttujan varsien kulman laskentaa varten.

Laajennuksen taustalla on käynnissä daemon-prosessi, joka toimii viestien välittäjänä robotin ohjaimen ja tarttujan välillä. Daemon-prosessi piti toteuttaa, sillä URCaps-laajennuksen

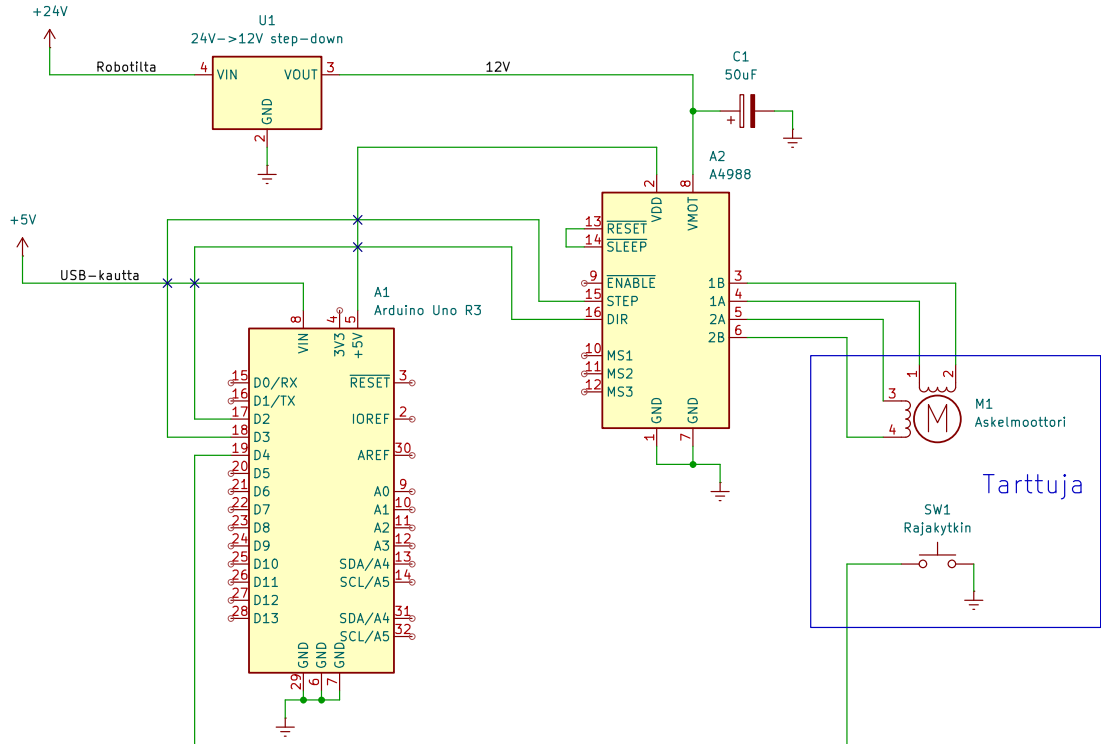
kautta ei ollut ilman tätä mahdollista luoda yhteyttä tarttujan ohjaukseen käytettävään Arduino-mikrokontrolleriin. Daemon on kirjoitettu Python-ohjelmointikielellä, sillä tämän tyyppisen daemon-prosessin käynnistämiseen löytyi suora tuki URCaps-laajennuksen sisältä.

Daemon-prosessi ottaa vastaan laajennukselta tarttujalle tarkoitetut liikekäskyt ja muuttaa ne tarttujan ymmärtämään muotoon. Tämän jälkeen tieto välitetään tarttujalle, joka liikkeen suoritettuaan kuittaa daemonille liikkeen suorituksen. Kuittauksen jälkeen daemon palauttaa laajennukselle tiedon liikkeen suorituksesta tai mahdollisista virheistä, jonka jälkeen robotin normaali ohjelma jatkaa suoritustaan. Virheen sattuessa, eli jos tarttuja ei esimerkiksi ilmoita suorittaneensa haluttua asennon muutosta, robotin ohjelman suoritus keskeytyy ja se ilmoittaa käyttäjälle virheestä.

Daemon-prosessin ja laajennuksen välinen tiedonsiirto on toteutettu käyttämällä XML-RPC-protokollaa, joka on lyhenne sanoille XML Remote Procedure Call (XML-etäproseduurikutsu). Tällä protokollalla voidaan kutsua muiden ohjelmien proseduureja, tässä tapauksessa daemon-prosessin toteuttamia liikekäskyjä tarttujalle, etänä verkon yli. Protokollan tiedonsiirto tapahtuu XML-formaatissa (Extensible Markup Language). (UserLand Software 1999)

Elektroniikka

Tarttujan asennon ohjaaminen askelmoottorilla vaatii askelmoottorin tarkkaa ohjausta robotilta tulevien käskyjen mukaan. Ohjauksen keskiössä on Arduino Uno R3-mikrokontrolleri, joka ottaa vastaan robotilta tulevia liikekäskyjä, sekä ohjaa askelmoottoria askelmoottorin ohjainpiirin kautta. Piirin kytkentäkaavio nähdään kuvassa 4.17.



Kuva 4.17. Tarttujan ohjauselektronikan kytkentäkaavio.

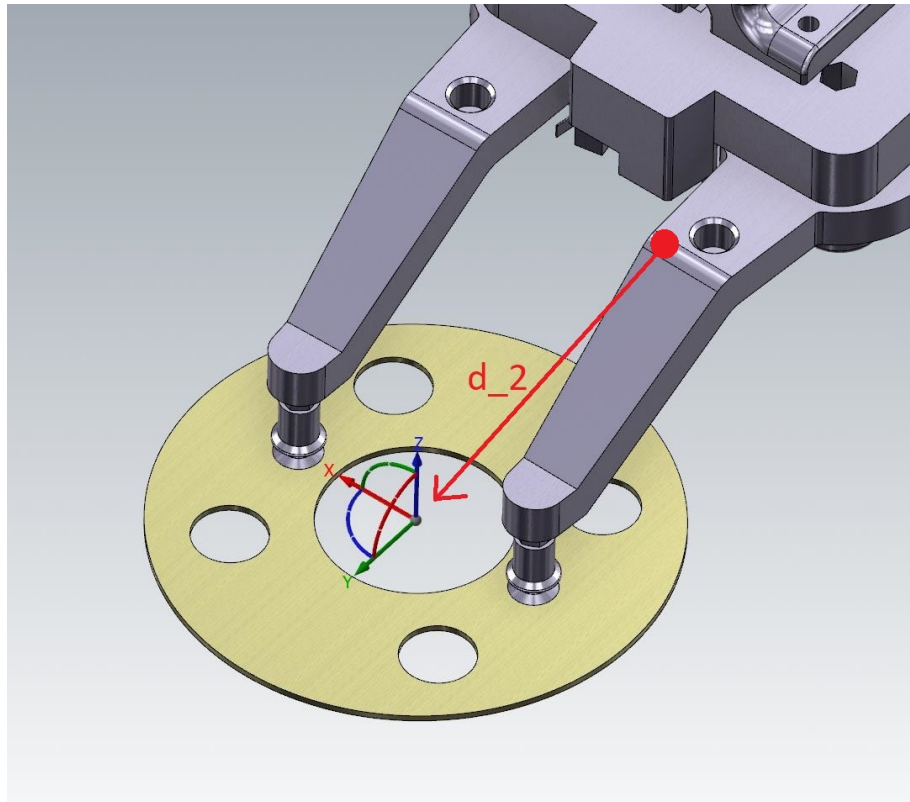
Piiri saa Arduinon USB-kaapelin kautta virran logiikkapuolelle ja robotin virtalähteestä tuleva 24 V jännite muutetaan 12 V jännitteeksi jännitteenalennuspiirillä askelmoottorin ohjaimelle askelmoottorin liikuttamista varten. Askelmoottorin ohjaimen lisäksi Arduinoon on liitetty tarttujassa sijaitseva rajakytkin, jonka avulla tarttujan alustava asento voidaan tarttujan käynnistämisen jälkeen selvittää liikuttamalla vartta sitä kohti, kunnes rajakytkin sulkeutuu.

Arduino Unon ja robotin välinen tiedonsiirto on toteutettu USB-portin kautta emuloidulla sarjaporttiliitännällä. Arduino Uno R3 sisältää Atmega16U2-piirin (Arduino Support 2024), joka toimii USB-UART-sarjaporttimuuntimena. Tämän kautta Arduino Uno on kytetty robotin ohjaimen USB-liitännällä ja Arduinon sisäisesti tiedonsiirto toimii UART-sarjaliikenteenä Arduinon pääasiallisen mikrokontrollerin ja Atmega16U2 välillä.

4.3.4 Tarttujan käyttö

Tarttujan käyttäminen vaatii imukuppien etäisyyden ohjaamisen lisäksi tarttujan ohjaamisen oikeaan paikkaan, jotta imukupit voivat saada otteen poimittavasta leikkeestä. Universal Robots UR5 -robotilla, jolla tarttujan testit suoritettiin, työkalun ohjaaminen tiettyyn sijaintiin vaatii kolmiulotteisessa tilassa koordinaatit sekä työkalun käännön kaikkien

kolmen akselin suhteen. Tällöin tarttujan kokonaisuuden käyttäminen vaatii robotin ohjelmointiin seitsemän arvoa: kolme koordinaattiarvoa, jotka paikoittavat tarttujan oikeaan paikkaan, kolme arvoa oikean käännön toteuttamiseksi, sekä etäisyysarvon tarttujan varsien kulman säätämiseen. Tarttujassa ei ole itsessään leikkeiden sijainnin tai kulman tunnistamiseen antureita, joten robotti tulee pystyä ulkoisesti ohjaamaan oikeaan sijaintiin.



Kuva 4.18. Tarttujan työkalukoordinaatisto tartunnan aikana.

Työkalukoordinaatisto

Tarttujan käytössä tavoitteena on saavuttaa kuvan 4.18 mukainen tilanne, jossa tarttujan imukupit on liikutettu sopivaan kohtaan poimittavaa leikettä oikeassa kulmassa. Kuvassa nähtävä koordinaatisto leikkeen keskellä kuvaa tavoitepaikan sijaintia ja kulmaa, joka tulisi robotin liikkeen lopuksi olla sama kuin tarttujan työkalukoordinaatiston sijainti ja kulma.

Tarttujan ohjaukseen käytettävään URCaps-laajennukseen annetaan parametrina tarttujan rungon työkalukoordinaatisto (kuva 4.15). Laajennus olettaa rungon työkalukoordinaatiston keskiön sijaitsevan imukuppien kärkien tasolla ja varsien käännön keskiöiden puolivälissä. Työkalukoordinaatiston tulee olla orientoitu kuvan 4.18 mukaisesti. Kuvassa rungon työkalukoordinaatiston keskiötä esittää nuolen d_2 alkupiste, joka sijaitsee tarttujan alapuolella.

Kun URCaps-laajennuksen kautta toteutetaan imukuppien etäisyyden muutos, sen oh-

jelmointi luo tarttujan rungon työkalukoordinaatiston avulla uuden siirretyn työkalukoordinaatiston, ja asettaa tämän siirretyn työkalukoordinaatiston aktiiviseksi robotin käyttöön. Kuvassa 4.18 tätä havainnollistaa nuoli d_2 , jonka alkupisteessä sijaitsee rungon työkalukoordinaatisto, ja sen kärjessä oleva koordinaatisto on siirretty nuolen mukaisesti sen alkupisteestä. Siirto tapahtuu koordinaatiston Y-akselin suuntaisesti etäisyyden d_2 verran. Siirron jälkeen koordinaatisto sijaitsee imukuppien kärkien puolivälissä. Siirtoetäisyys d_2 saadaan yhtälön 4.6 avulla. Siirretyn työkalukoordinaatiston avulla robottia voidaan ohjata suoraan koordinaattiarvoilla. Tarttujan imukuppien paikan muutos on tällöin automaattisesti otettu huomioon robotissa, jolloin sitä ei tarvitse erikseen ulkoisesti kompensoida siirtämällä liikeradan koordinaatteja ennen liikekäsken suorittamista.

Jos tarttujaa halutaan käyttää muilla roboteilla joissa kyseinen URCaps-laajennus ei toimi, täytyy koordinaatiston siirto toteuttaa robotissa jollakin eri tavalla. Vaihtoehtoja voivat olla esimerkiksi kiinteiden työkalukoordinaatistojen tallennus ennalta määritetyille tarttujan asennoille, tai koordinaattiarvojen siirto ulkoisesti, jos robottia ohjataan jonkin muun järjestelmän kautta.

Leikkeen poiminta

Leikkeen poiminta tarttujalla suoritetaan imukuppien etäisyyden säädön jälkeen samoin kuin normaalilla imukuppitarttujalla. Tarttuja tulee liikuttaa leikkeen pintaan siten, että imukupit tulevat sallittuun kohtaan leikettä. Imukuppien tulee koskettaa leikkeen pintaa, jotta alipaineen kytkeytyessä päälle ne saavat leikkeestä otteen. Leikkeen nostaminen ja liikkuttaminen on mahdollista, kun alipaine on kytketty päälle ja leike on kiinni imukupeissa. Alipaine tulee kytkeä pois päältä, kun leike on siirretty haluttuun paikkaan ja se halutaan irroittaa tarttujasta. Leikkeen tulee myös aina olla irroitettuna, kun tarttujan imukuppien etäisyyttä halutaan muuttaa.

4.4 Valmistettu prototyyppi

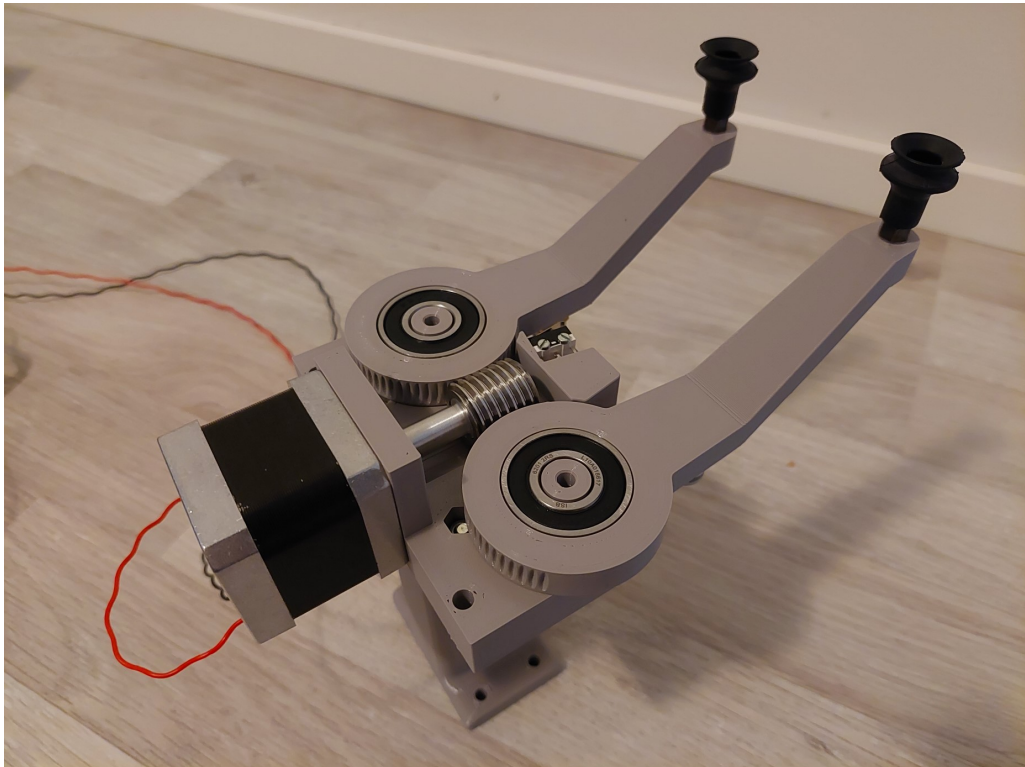
Tarttujan prototyyppi valmistettiin 3D-tulostamalla suurin osa osista, kuten tarttujan runko sekä kääntyvät varret hammastuksineen. Tulostus tehtiin Prusa Mk4 -tulostimella käyttäen PETG-muovia. Tämä muovi kestää hyvin kosketusta erilaisten kemikaalien kanssa, sekä se on suhteellisen joustavaa ja kestävä. Tarttujalla käsitellään kevyitä leikkeitä, jolloin tarttujan osilta ei vaadita kovin suurta lujuutta.



Kuva 4.19. Tarttujan prototyyppi UR5-robottiin kiinnitettynä.

Liikemekanismin kierreruuvi koneistettiin ruostumattomasta teräksestä, sekä siihen kiinnitetty akseli alumiinista. Nämä osat nähdään kuvassa 4.20. Koneistettuna kierreruuvien mittatarkkuus ja pinnanlaatu ovat paljon paremmat kuin 3D-tulostamalla, joka tuottaa mekanismin sulavamman toiminnan ja vähentää osien kulumista käytössä. Käytetty askelmoottori on NEMA 23 -kokoa. Pienempikin askelmoottori olisi ollut riittävä, mutta tämä askelmoottori oli helposti saatavilla.

Tarttujan runkoon on kiinnitetty kuvassa 4.19 alipaine-ejektori, jonka avulla tarttujan imu-kupeille voidaan tuottaa alipaine käyttämällä paineilmaa. Alipaine voidaan tuoda tarttujalle myös esimerkiksi ulkoiselta alipainepumpulta.



Kuva 4.20. Tarttujan prototyypin sisäinen mekanismi.

Prototyypin ohjauselektronikka sovitettiin 3D-tulostettuun laatikkoon, johon integroitiin lisäksi myös pieni tuuletin komponenttien jäähdytystä varten. Laatikon ja tarttujan välillä kulkee kaksi kaapelia, joista toinen menee askelmoottorille ja toinen varsien kulman rajakytkimelle. Tässä päädyttiin käyttämään kahta kaapelia, sillä askelmoottorin ohjaukseen käytettävät johdot tuottivat testeissä liian suurta häiriötä rajakytkimen johtoihin jos ne kulkivat saman monisäikeisen kaapelin sisällä. Tämä aiheutti virheellisiä rajakytkimen sulkeutumisen tunnistuksia askelmoottorin liikkeen aikana.

5. TULOKSET

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin säädettävä imukuppitarttuja, jonka imukuppien välistä etäisyyttä voidaan automaattisesti säätää robotin kautta erilaisille leikkeille sopivaksi. Rakennetun prototyypin kautta tarttujan suunniteltuja ominaisuuksia testattiin ja varmistettiin sen toiminta. Edellä on käsitelty tarttujaan liittyvien osa-alueiden tulokset.

Tarttujan käynnistyminen

Rakennettu tarttuja käynnistyy onnistuneesti, kun se kytketään sekä robotin virtalähteen, että robotin ohjaimen USB-kaapelin kautta. Tarttuja hakee automaattisesti käynnistyksen yhteydessä sen varsien todellisen kulman liikuttamalla sen varsia lähemmäs toisiaan, kunnes tarttujan runkoon kiinnitetty rajakytkin antaa signaalin. Signaalin saatuaan tarttuja siirtyy onnistuneesti tilaan, jossa se odottaa robotilta tulevia liikekäskejiä. Tarttuja on käynnistetty yhteensä kymmeniä kertoja, ja käynnistys on onnistunut luotettavasti.

Robotin ohjaimen URCaps-laajennus

Robotin ohjaimelle ohjelmoitu laajennus toteuttaa robotin käyttöliittymään asetusnäkyvän, ohjelmanäkymän ja daemon-prosessin. Asetusnäkyvän arvot säilyvät laajennuksen muistissa robotin käynnistyskertojen välillä suunnitellulla tavalla, sekä asetusnäkyvän painikkeet daemon-prosessin käynnistämiseen ja sammuttamiseen toimivat. Ohjelmanäkymä voidaan asettaa haluttuun kohtaan robotin ohjelmaa ja siihen voidaan asettaa haluttu imukuppien etäisyys. Ohjelmanäkymän ohjelmointi toteuttaa tarttujan työkalukoordinaatiston siirron imukuppien etäisyyden vaihtuessa odotettulla tavalla, joka varmistettiin graafisesti robotin ohjaimen näytöltä. Daemon-prosessin todettiin käynnistyvän asetusnäkyvän painikkeesta ja daemon vastaa onnistuneesti sille lähetettyihin käskyihin.

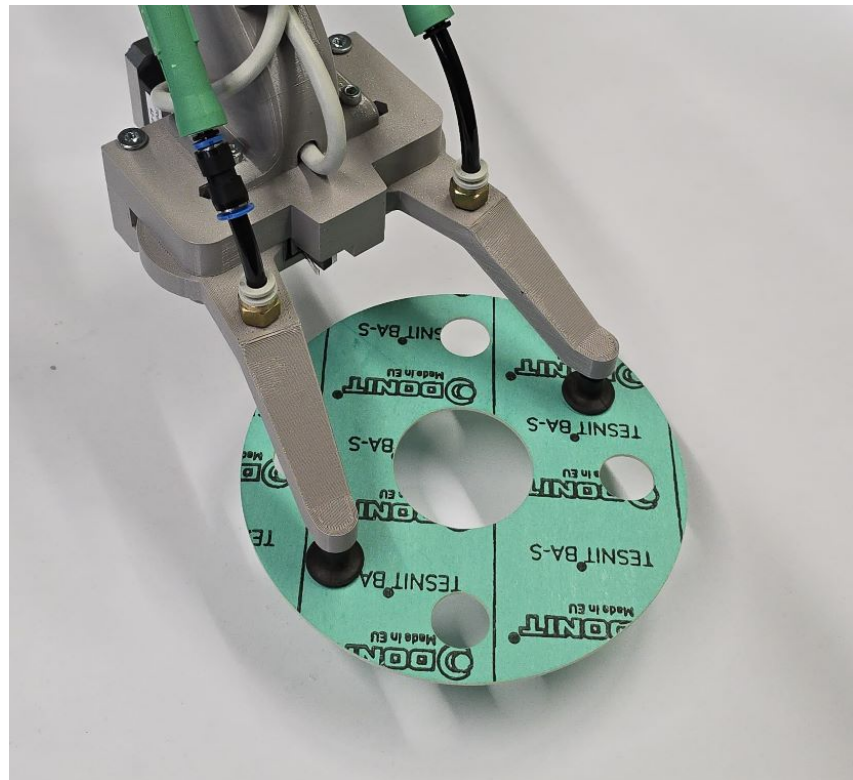
Tarttujan imukuppien etäisyyden säätö

Tarttujan imukuppien etäisyyden ohjaaminen robotin ohjaimesta todettiin toimivan. Imukuppien etäisyyttä säädettiin testien aikana kymmeniä kertoja, jotka onnistuivat kaikki

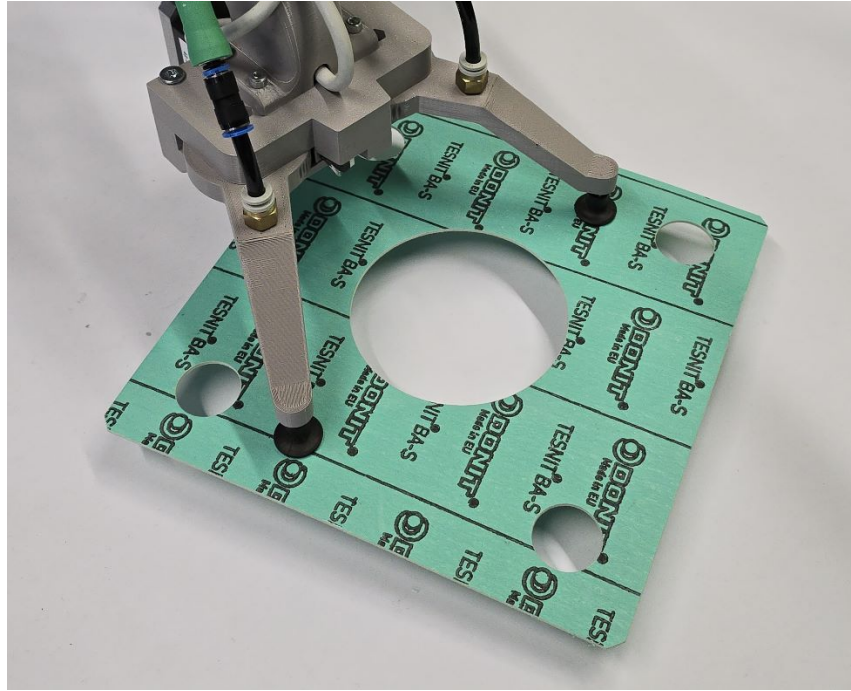
luotettavasti. Imukuppien toteutunut etäisyys mitattiin eri asennoissa mittanauhaa käyttämällä ja toteutunut mitta oli jokaisella kerralla halutun suuruinen. Tarttuja reagoi sille annettuun käskyyn ilman havaittavaa viivettä. Imukuppien etäisyyden muuttuminen kesti alle sekunnista suurimmillaan muutamaan sekuntiin riippuen etäisyyden muutoksen suuruudesta.

Leikkeiden poiminta tarttujalla

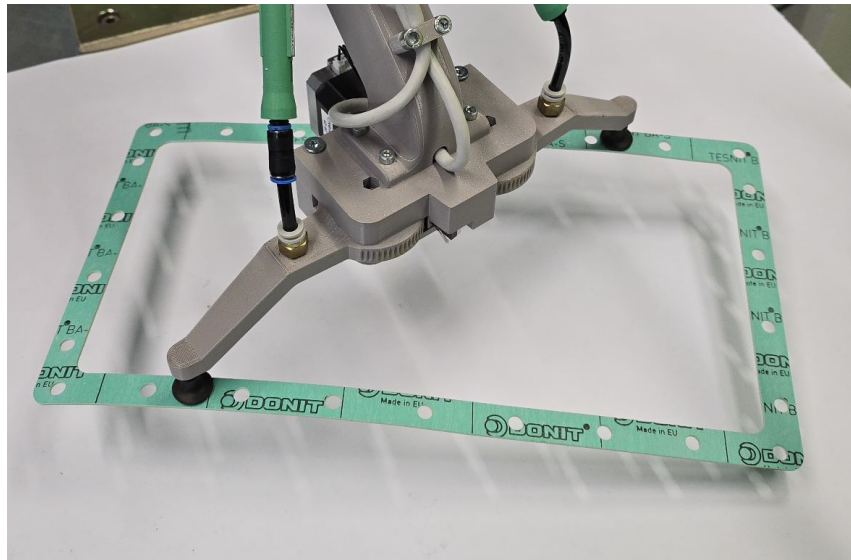
Rakennettua tarttujaa testattiin eri kokoisten tiivisteiden poiminnassa, ja sen havaittiin pystyvän käsittelemään onnistuneesti määritellyn kokoalueen kappaleita. Tarttuja oli testeissä Universal Robots UR5 -robottiin kiinnitetty, ja tiivisteitä poimittiin tasaiselta alustalta. Testeissä käytettiin samoja kuituvahvisteisia tiivisteitä, joita käytettiin aiemmin työssä imukuppien toiminnan testauksessa. Näiden tiivisteiden koot ja painot löytyvät kuvasta 4.1, ja niiden nostaminen tarttujalla on esitetty kuvissa 5.1, 5.2 ja 5.3.



Kuva 5.1. Pienen tiivisteiden poiminta tarttujalla.



Kuva 5.2. Keskisuuren tiivisteen poiminta tarttujalla.



Kuva 5.3. Suuren tiivisteen poiminta tarttujalla.

Tiivisteiden poiminnassa tarttujalla ei havaittu niiden käsittelyn puolesta eroa osion 4.1 testeihin, joissa tiivisteitä poimittiin käyttämällä kahta imukuppia 3D-tulostettuun osaan kiinnitettynä. Ainut kosketuspinta tiivisteisiin tartunnan aikana on tarttujan imukupit, joten erona tilanteiden välillä on tarttuja/osa, jossa imukupit ovat kiinni.

6. ANALYYSIT JA PÄÄTELMÄT

Tässä osiossa vastataan työn tutkimuskysymyksiin, arvioidaan työn tuloksien mahdollisia epävarmuustekijöitä, ja pohditaan tulosten yleistettävyyttä sekä merkittävyyttä. Lisäksi pohditaan työn jatkokehitystarpeita, jotta tarttuja olisi valmis teolliseen käyttöön. Lopuksi listataan jatkokehitysideoita, joilla työn tuloksia voisi kehittää pidemmälle.

6.1 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

Työssä etsittiin vastauksia kolmeen tutkimuskysymykseen:

1. Mitä tulee ottaa huomioon levymäisten leikkeiden poiminnassa?
2. Minkälainen tarttuja täyttää leikkeiden poiminnan suunnitteluvaatimukset?
3. Kuinka robotin ja tarttujan integraatio ja käyttö voidaan toteuttaa?

Näihin kysymyksiin vastataan seuraavaksi.

Mitä tulee ottaa huomioon levymäisten leikkeiden poiminnassa?

Levymäisten leikkeiden poiminnassa tulee huomioida erityisesti leikkeiden geometria, materiaaliominaisuudet ja pinnan laatu. Koska leikkeiden muodot, paksuudet ja materiaalit vaihtelevat, tarttujan tulee pystyä sopeutumaan näihin muuttuviin olosuhteisiin ilman manuaalisia asetusten muutoksia. Lisäksi tartuntamekanismin on oltava riittävän hellävarainen, jotta se ei vaurioita leikkeitä, mutta samalla myös riittävän luja, jotta kappaleet pysyvät tukevasti kiinni noston ja siirron aikana.

Minkälainen tarttuja täyttää leikkeiden poiminnan suunnitteluvaatimukset?

Suunnitteluvaatimukset täyttävä tarttuja on imukuppitarttuja, jonka imukoppien etäisyyttä toisistaan voidaan automaattisesti säätää erilaisille leikkeille sopivaksi. Valmistettu prototyyppi sisältää kaksi vartta, joiden päissä on imukupit. Imukoppien välistä etäisyyttä ohjataan askelmoottorilla kierukkavaihteen avulla. Valittu rakenne mahdollistaa useiden eri kokoisten ja muotoisten leikkeiden käsittelyn. Tarttujaa testattiin eri kokoisilla tiivisteillä, ja sen havaittiin pystyvän käsittelemään onnistuneesti määritellyn kokoalueen kappaleita.

Kuinka robotin ja tarttujan integraatio ja käyttö voidaan toteuttaa?

Robotin ja tarttujan integraatio toteutettiin UR5-robottiin kehitetyn URCaps-laajennuksen avulla, joka mahdollistaa tarttujan imukuppien välisen etäisyyden ohjaamisen suoraan robotin käyttöliittymästä. Tarttujaan on kiinnitetty Arduino Uno -mikrokontrolleri, joka vastaanottaa robotilta tulevat käskyt ja ohjaa tarttujan askelmoottoria. Integraation onnistuminen osoitettiin tarttujan prototyypin testeissä, joissa robotti pystyi luotettavasti suorittamaan tartuntaprosessin eri leikkeiden kanssa ilman manuaalista säätöä erilaisten leikkeiden poiminnan välillä. Tarttujan käyttöä varten toteutettu URCaps-laajennus myös siirtää automaattisesti robotin työkalukoordinaatiston sijaitsemaan tarttujan imukuppien keskelelle, jolloin tarttujaa voidaan liikuttaa suoraan koordinaattiarvojen avulla.

6.2 Tulosten epävarmuustekijät

Vaikka kehitetty tarttuja osoitti toimivuutensa testatuissa olosuhteissa, siihen liittyy useita mahdollisia virhelähteitä ja epävarmuustekijöitä, jotka tulee huomioida tulosten tulkinnassa ja ratkaisun jatkokehityksessä.

Testiympäristön yksinkertaisuus

Tarttujan toimivuutta arvioitiin testitilanteissa, joissa kappaleet asetettiin paikoilleen suhteellisen hallituissa olosuhteissa. Tämä ei täysin vastaa teollista ympäristöä, jossa kappaleet voivat olla satunnaisissa asennoissa, päällekkäin tai osittain toistensa peitossa. Tällaisissa tilanteissa tartuntapinnan varmuus ja tarttujan geometrinen ulottuvuus voivat vaikuttaa olennaisesti onnistumiseen.

Alipaineen muodostus ja pitävyys

Tarttujan toimintaperiaate perustuu imukuppien muodostamaan alipaineeseen. Alipaineen tehokkuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten tiivisteiden pintaominaisuudet, pinnan puhdistus, mahdollinen muotoilu ja materiaalin joustavuus. Jos tartuttava pinta on esimerkiksi epätasainen tai pölyinen, tarttujan kyky muodostaa riittävä alipaine saattaa heikentyä olennaisesti.

Testattujen kappaleiden rajallinen otos

Tarttujan testaamisessa käytettiin rajattua määrää tiivisteitä, jotka vaihtelivat kooltaan ja materiaaliltaan, mutta eivät edustaneet koko teollisten leikkeiden kirjoa. Tulokset eivät siten välttämättä ole suoraan yleistettävissä kaikkiin mahdollisiin tiiviste- ja leiketyppeihin, kuten hyvin pieniin, taipuisiin tai monimutkaisesti muotoiltuihin kappaleisiin.

Ohjausjärjestelmän luotettavuus

Tarttujan ohjaus toteutettiin UR5-robotin kautta hyödyntämällä URCaps-laajennusta. Vaik-

ka ohjaus toimi suunnitellusti, järjestelmän luotettavuuteen voi vaikuttaa ohjelmistopäivitykset, muutokset robotin järjestelmään tai signaalien häiriöt tuotantoympäristössä. Myös käyttäjän osaaminen robotin ohjelmoinnissa voi vaikuttaa käytettävyyteen ja tehokkuuteen.

Haastattelun subjektiivisuus

Tarttujan suunnittelu pohjautui osin asiantuntijahaastatteluun, jonka kautta saatu tieto oli keskeinen osa suunnitteluvaatimusten muodostamista. Haastatteluissa esiintyvä subjektiivisuus tai yksittäisen toimijan erityistarpeet saattavat kaventaa näkökulmaa ratkaisun soveltuvuudesta laajemmassa mittakaavassa.

Dynaamisten kuormien vaikutus

Prototyypin toimivuutta testattiin lähinnä staattisissa tartuntatilanteissa. Todellisissa sovelluksissa robotin liikuttelu voi aiheuttaa kiihtyvyyksiä ja sitä kautta voimia, joiden vaikutusta imukuppien pitoon ei kattavasti analysoitu. Tämä saattaa heikentää tartunnan luotettavuutta esimerkiksi nopeissa siirtoliikkeissä.

6.3 Tulosten yleistettävyys

Kehitetyn tarttujan yleistettävyys muihin käyttökohteisiin on tärkeä kysymys erityisesti silloin, kun ratkaisua halutaan hyödyntää osana joustavaa ja nopeasti muuntautuvaa tuotantoa. Tarttujan suunnittelussa pyrittiin huomioimaan mahdollisimman laaja valikoima levymäisiä teollisia leikkeitä, mutta tietyt rajoitukset kaventavat suoraa yleistettävyttä.

Tarttujan toiminta perustuu oletukseen, että poimittavat kappaleet ovat itsessään riittävän jäykkiä säilyttääkseen muotonsa noston aikana. Tämä rajaa pois hyvin ohuet tai taipuisat materiaalit, kuten kumitiivisteet, pehmeät muovikalvot tai tekstiilimäiset leikkeet. Näiden osalta vaaditaan toisenlaista tartuntaperiaatetta tai erilaista tarttujan rakennetta.

Imukuppeihin perustuva tartunta toimii parhaiten tasaisilla, tiiviillä pinoilla, joissa voidaan muodostaa riittävä alipaine. Kappaleet, joissa on rei'ityksiä, hyvin karhea tai huokoinen pinta, tai paljon korkeuseroja, voivat aiheuttaa vuotoja tai estää tartunnan kokonaan. Tällöin tarvitaan joko erilaisia imukupityyppejä tai kokonaan muunlaista tartuntaperiaatetta.

Tarttujan rakenne ja toimintaperiaate soveltuvat erityisen hyvin koneenrakennuksessa käytettyjen tiivisteiden poimintaan, kuten työssä on käsitelty. Vastaavia sovelluksia löytyy kuitenkin myös muilta aloilta, kuten pakkausteollisuudesta, elektroniikasta tai kuljetinlinjastolta osien poiminnasta. Näissä sovelluksissa tarvitaan kuitenkin tarkempaa selvitystä esimerkiksi kappaleiden materiaaliominaisuuksista, pintojen ominaisuuksista ja ympäristöolosuhteista.

Tarttujan suunnittelu optimoitiin tietylle kokoluokalle, jossa kappaleiden painot ja koot asettuvat tiettyjen rajojen sisään. Erittäin suuret tai hyvin pienet leikkeet saattavat vaatia erikokoisia imukuppeja, eri määrän tartuntapisteitä tai rakenteellisesti erilaisen tarttujan. Näin ollen tarttujan yleistettävyyttä edellyttää mittakaavan ottamista huomioon, kun mietitään lähestymistapaa eri kokoisten leikkeiden poimintaan.

Tarttujan käyttö testattiin UR5-robotin kanssa, mutta ohjausratkaisun ja rakenteen voidaan katsoa olevan yleistettävissä myös muihin teollisuusroboteihin, joissa on mahdollisuus oman ohjelmakoodin suoritukseen robotin ohjaimessa, jotta tarttujan ohjaus on mahdollista.

6.4 Kehitetyn tarttujan merkittävyys

Työssä kehitetty tarttuja tarjoaa ratkaisun konkreettiseen haasteeseen, joka liittyy teollisten leikkeiden automatisoituun käsittelyyn silloin, kun kappaleiden muodot, materiaalit ja koot vaihtelevat. Tarttujan merkittävyys perustuu sen soveltuvuuteen joustavan tuotannon tarpeisiin sekä siihen, että se on suunniteltu pienyritysten kustannustehokkuus ja käytettävyys huomioiden. Kehitetyn tarttujan suurin vahvuus on sen säädettävä rakenne, joka mahdollistaa imukuppien välisen etäisyyden muuttamisen kappaleen koon mukaan. Tämä parantaa tarttujan monikäyttöisyyttä, sillä samaa tarttujaa voidaan hyödyntää erilaisten kappaleiden poimintaan ilman rakenteellisia muutoksia. Tällainen joustavuus on etu esimerkiksi silloin, kun tuotantolinjalla vaihdetaan valmistettavaa tuotetta usein tai käsitellään pieniä sarjoja.

Tarttuja on suunniteltu yhteensopivaksi UR5-robotin kanssa, mutta sen rakenne ja ohjausratkaisu mahdollistavat yhteensopivuuden myös muiden valmistajien robottien kanssa. Tarttujan käyttöliittymäksi kehitetty URCaps-laajennus tukee helppoa käyttöönottoa ja ohjelmointia Universal Robotsin robotteja käytettäessä, mikä alentaa käyttöönoton kynnyksiä etenkin niissä yrityksissä, joissa ei ole syvää automaatio-osaamista. Tämä lisää laitteen käytännön hyödynnettävyyttä erityisesti pienissä yrityksissä.

Työssä esitetty ratkaisu perustuu osin standardikomponentteihin ja yksinkertaisiin mekaanisiin ratkaisuihin, jotka tekevät siitä helposti valmistettavan ja huollettavan. Tämä mahdollistaa ratkaisun käytön ilman merkittäviä investointeja tai erikoisosaamista. Lisäksi käyttöönotto voi olla mahdollista myös sellaisilla toimialoilla ja yrityksissä, joissa perinteinen automatisointi ei ole ollut taloudellisesti kannattavaa.

Vaikka tarttuja suunniteltiin leikkeiden poimintaan, sen peruseriaate on todennäköisesti sovellettavissa myös muihin tasopintaisten kappaleiden käsittelytehtäviin. Esimerkiksi pakkaus- ja lajittelutehtävissä, joissa poimittavat tuotteet ovat samankaltaisia muodoltaan mutta vaihtelevat hieman kooltaan, tarttuja voisi toimia lähes sellaisenaan.

6.5 Jatkokehitystarpeet teolliseen käyttöön

Vaikka kehitetty tarttuja osoittautui lupaavaksi ratkaisuksi teollisten leikkeiden poimintaan, sen käytännön soveltaminen laajamittaiseen teolliseen tuotantoon edellyttää vielä useita jatkokehitystoimia. Laitteen luotettavuutta, kestävyyttä ja käyttövarmuutta täytyy parantaa, jotta se sopii oikeaan tuotantoympäristöön.

Prototyyppi valmistettiin pääosin testikäyttöä varten ja sen materiaalivalinnat eivät kaikilta osin vastaa teollisen käytön vaatimuksia. Pitkäaikaisessa käytössä esimerkiksi liike-mekanismien mekaaninen kuluminen, tarttujan rungon ja varsien materiaalivalinnat sekä elektroniikan lämpö- ja värinäkestävyys on otettava tarkemmin huomioon. Tulevissa versioissa tulisi hyödyntää teollisuuslaatuisia komponentteja ja materiaaleja, jotka kestävät jatkuvaa käyttöä sekä mahdollisesti haastavia ympäristöolosuhteita. Esimerkiksi tarttujan rungon ja varsien valmistus metallista parantaisi tarttujan kestävyyttä huomattavasti, jotta esimerkiksi robotin virheliikkeestä syntyvä törmäys ei rikkoisi tarttujaa.

Teollisessa tuotannossa nopeus ja toistettavuus ovat keskeisiä vaatimuksia. Tarttujan nykyinen säätö perustuu askelmoottoriin, jonka todellista liikettä ei pystytä tunnistamaan. Jatkokehityksessä voitaisiin integroida tarkempaa paikkatietoa hyödyntävä säätöjärjestelmä esimerkiksi enkooderipohjaisella palauteella. Tämä vähentäisi virheiden mahdollisuutta, jos liikemekanismi esimerkiksi jäisi jumiin. Lisäksi tarttujan luotettavuutta voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä siihen antureita, jotka valvovat tartunnan onnistumista reaaliaikaisesti. Esimerkiksi alipaineen mittaus tai voima-anturit voisivat tarjota palautteen robotin ohjausjärjestelmälle, mikä mahdollistaisi virheiden automaattisen tunnistamisen ja käsittelyn. Näin ollen robotti voisi tunnistaa, jos tartunta epäonnistuu tai kappale putoaa siirron aikana.

Teollisessa käyttöönötossa laitteiston tulisi lisäksi täyttää robottien turvallisuutta koskevat standardit, jos tarttujaa käytettäisiin ihmisten kanssa samassa tilassa.

6.6 Jatkotutkimusehdotukset

Työssä kehitetty tarttuja tarjoaa hyvän lähtökohdan jatkokehitykselle, mutta useita tutkimuksellisia ja käytännön kysymyksiä jäi avoimeksi. Seuraavaksi esitellään ehdotuksia tuleville tutkimuksille, joiden avulla ratkaisun toimivuutta ja sovellettavuutta voidaan edelleen parantaa sekä teoreettisesti että käytännön näkökulmasta.

1. Konenäön hyödyntäminen: Yhdistämällä tarttuja konenäköön tai 3D-kamerajärjestelmään voitaisiin parantaa kappaleiden tunnistamista ja paikannusta tuotantolinjalla. Tällöin

tarttuja voisi mukauttaa toimintansa kappaleen muodon, sijainnin tai asennon mukaan, mikä voisi mahdollistaa suuremman luotettavuuden kappaleiden poimintaan.

2. Laajempi testaus todellisissa tuotantoympäristöissä: Prototyypin jatkotestaus voitaisiin toteuttaa käytännön teollisissa sovelluksissa yhteistyössä yritysten kanssa. Kenttätestauksen avulla saataisiin arvokasta tietoa laitteen luotettavuudesta, käytäjäystävällisyydestä ja siitä, että miten ratkaisu integroituu osaksi olemassa olevia prosesseja.
3. Anturiteknologian integrointi: Kuten teollisen käytön jatkokehitystarpeissa mainittiin, tartuntaprosessin luotettavuuden parantamiseksi olisi hyödyllistä tutkia erilaisen anturien, kuten alipaine-, voima-, kosketus- tai etäisyysantureiden käyttöä osana tarttujan toimintaa. Näiden antureiden avulla tarttuja voisi havaita esimerkiksi epäonnistuneen tartunnan tai väärin sijoittuneen kappaleen ja tilanteeseen voitaisiin reagoida automaattisesti.
4. Tartunta vaikeasti käsiteltäville pinnoille: Nykyinen tarttuja perustuu imukuppien avulla toteutettavaan alipainetartuntaan, mikä rajoittaa sen käyttöä erityisesti huokoisten, karheiden tai epätasapintaisten kappaleiden kanssa. Jatkossa voisi tutkia muita tartuntaperiaatteita yhdistettynä samaan tarttujaan, kuten kitkaan perustuvaa puristusta tai muodon ympärille sulkeutuvia ratkaisuja yhdistettynä imutarttumisen kanssa. Usean tartuntaperiaatteen avulla toiminta voisi laajentua muille materiaalityypeille.
5. Taloudellinen analyysi: Jatkotutkimuksissa voitaisiin arvioida tarttujan käyttöönoton taloudellista vaikutusta verrattuna muihin ratkaisuihin, kuten kiinteisiin tarttujamalleihin tai manuaaliseen käsittelyyn. Investoinnin kannattavuutta voitaisiin tarkastella esimerkiksi takaisinmaksuajan, tuotannon tehostumisen tai henkilöstökulujen näkökulmasta.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin prototyyppi robotin tarttujasta, joka soveltuu teollisten levymäisten leikkeiden poimintaan. Tavoitteena oli kehittää ratkaisu, joka tukee joustavaa tuotantoa ja soveltuu erityisesti tilanteisiin, joissa käsiteltävät kappaleet vaihtelevat muodoltaan, kooltaan ja materiaaliltaan. Työ perustui konstruktiiiviseen tutkimusotteeseen, ja sen tueksi tehtiin kirjallisuuskatsaus sekä haastattelu teollisuustoimijan kanssa.

Suunnittelu pohjautui kolmeen tutkimuskysymykseen, joiden avulla selvitettiin levymäisten leikkeiden poimintaan liittyviä vaatimuksia, tarvittavan tarttujan konstruktiota, sekä sen integrointia robottijärjestelmään. Työssä kehitettiin säädettävä robotin tarttuja, jossa imu-
kupit liikkuvat askelmoottorin avulla suhteessa toisiinsa, mahdollistaen erikokoisten kappaleiden käsittelyn samalla tarttujalla. Tarttujan käyttö testattiin Universal Robots UR5 -robotin kanssa, ja tarttujan ohjausta varten toteutettiin URCaps-laajennus. URCaps-laajennuksen avulla tarttujan ohjaus integroitiin osaksi robotin graafista käyttöliittymää.

Testien perusteella tarttuja osoitti toimivansa luotettavasti rajatussa testijoukossa ja tarjosi ratkaisun vaihtelevan muotoisten leikkeiden poimintaan. Pohdintaosiossa kuitenkin tunnistettiin epävarmuustekijöitä, kuten alipainetartunnan herkkyys pinnan ominaisuuksille, dynaamisten kuormien vaikutus sekä testausympäristön yksinkertaisuus verrattuna todelliseen tuotantoympäristöön.

Tarttujan yleistettävyyttä todettiin hyväksi tietyissä rajoissa. Se soveltuu erityisesti jäykille, tasapintaisille ja itsekantaville leikkeille, mutta vaatii lisäkehitystä taipuisiin, huokoisiin, tai erityisen pieniin tai suuriin kappaleisiin. Merkittäväksi ratkaisun tekee sen säädettävyys, helppo integroitavuus ja mahdollisuus käyttää sitä pienissäkin tuotantosarjoissa ilman laajaa muokkaustarvetta. Näin ollen tarttujan voidaan katsoa tukevan erityisesti pienten yritysten automatisointitarpeita kustannustehokkaalla tavalla.

Tarttujan teolliseen käyttöön ottaminen edellyttää jatkokehitystä useilla osa-alueilla: kestävämpien materiaalien käyttämistä ja rakenteiden vahvistamista, toiminnan varmuuden lisäämistä esimerkiksi antureilla, sekä turvallisuusvaatimusten huomioimista. Lisäksi kokenäön, antureiden lisäämisen ja muiden tartuntaperiaatteiden yhdistämisen tutkiminen voisi lisätä tarttujan käytön tehokkuutta.

LÄHTEET

- Arduino Support (2024). *Flash the USB-to-serial firmware for UNO Rev3 and earlier and Mega boards*. Verkkosivu. Saatavilla: <https://support.arduino.cc/hc/en-us/articles/4408887452434-Flash-the-USB-to-serial-firmware-for-UNO-Rev3-and-earlier-and-Mega-boards> (viitattu 20.01.2025).
- Bauman, Judson T (2008). *Fatigue, stress, and strain of rubber components : a guide for design engineers*. eng. Hanser Publications. ISBN: 1-61344-292-0.
- Bickford, John (1997). *Gaskets and Gasketed Joints*. eng. 1. painos. Milton: Taylor & Francis Group. ISBN: 0824798775.
- Campbell, Kasey L, Mark A Sidebottom, Cooper C Atkinson, Tomas F Babuska, Claudia A Kolanovic, Brian J Boulden, Christopher P Junk ja Brandon A Krick (2019). "Ultralow Wear PTFE-Based Polymer Composites The Role of Water and Tribochemistry". eng. *Macromolecules* 52.14, s. 5268–5277. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b00316.
- Chuang, Wei-Li, Ming-Ho Yeh ja Yi-Liang Yeh (2021). "Develop Real-Time Robot Control Architecture Using Robot Operating System and EtherCAT". eng. *Actuators* 10.7, s. 141–. DOI: 10.3390/act10070141.
- Courchesne, Julien, Philippe Cardou ja Palamanga Abdoul Rachide Onadja (2023). "A compact underactuated gripper with two fingers and a retractable suction cup". eng. *Frontiers in robotics and AI* 10, s. 1066516–1066516. DOI: 10.3389/frobt.2023.1066516.
- Fang, Bin, Fuchun Sun, Linyuan Wu, Fukang Liu, Xiangxiang Wang, Haiming Huang, Wenbing Huang, Huaping Liu ja Li Wen (2022). "Multimode Grasping Soft Gripper Achieved by Layer Jamming Structure and Tendon-Driven Mechanism". eng. *Soft robotics* 9.2, s. 233–249. DOI: 10.1089/soro.2020.0065.
- Fantoni, Gualtiero, Marco Santochi, Gino Dini, Kirsten Tracht, Bernd Scholz-Reiter, Juer-gen Fleischer, Terje Kristoffer Lien, Guenther Seliger, Gunther Reinhart, Joerg Franke, Hans Nørgaard Hansen ja Alexander Verl (2014). "Grasping devices and methods in automated production processes". eng. *CIRP annals* 63.2, s. 679–701. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.006.
- Flitney, Robert (2014). *Seals and sealing handbook*. eng. 6th ed. iChemE Seals and sealing handbook. Waltham, Massachusetts: Butterworth-Heinemann. ISBN: 0-08-099413-X.
- Gasket Handbook* (2017). 1. painos. Fluid Sealing Association ja European Sealing Association. Wayne, PA, USA; Morzine, France. Saatavilla: <https://www.fluidsealing.com/publications/#1627949928590-aa644cfc-f372> (viitattu 10.04.2025).

- Gawande, S. H. (2019). "Study on the effect of gasket thickness for bolted gearbox flange joint". eng. *SN applied sciences* 1.1, s. 32–. DOI: 10.1007/s42452-018-0030-y.
- Han, Xudong, Ning Guo, Yu Jie, He Wang, Fang Wan ja Chaoyang Song (2024). "On flange-based 3D hand–eye calibration for soft robotic tactile welding". eng. *Measurement : journal of the International Measurement Confederation* 238, s. 115376–. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115376.
- Hercog, Drago (2020). *Communication Protocols: Principles, Methods and Specifications*. eng. 1st Edition 2020. Cham: Springer International Publishing AG. ISBN: 3030504042.
- Honarpardaz, M., M. Tarkian, J. Ölvander ja X. Feng (2017). "Finger design automation for industrial robot grippers: A review". eng. *Robotics and autonomous systems* 87, s. 104–119. DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.003.
- Howser, Gerry (2019). *Computer Networks and the Internet: A Hands-On Approach*. eng. 1st ed. 2020. Cham: Springer Nature. ISBN: 3030344967.
- Huang, Shuaishuai, Yichen Wan, Xiaoqing Ming, Jiaming Zhou, Miaomiao Zhou, Hong Chen, Qi Zhang ja Shiping Zhu (2021). "Adhering Low Surface Energy Materials without Surface Pretreatment via Ion–Dipole Interactions". eng. *ACS applied materials & interfaces* 13.34, s. 41112–41119. DOI: 10.1021/acsami.1c11822.
- Jiang, Ping, Junji Oaki, Yoshiyuki Ishihara ja Junichiro Ooga (2023). "Multiple-object Grasping Using a Multiple-suction-cup Vacuum Gripper in Cluttered Scenes". eng. *arXiv.org*. DOI: 10.3390/robotics13060085.
- Karadağ, Ahmet Emin ja Ali Kılıç (2023). "Non-destructive robotic sorting of cracked pistachio using deep learning". eng. *Postharvest biology and technology* 198. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.112229.
- Kashyap, Bidisha ja V Ravi (2020). "Universal Verification Methodology Based Verification of UART Protocol". eng. *Journal of physics. Conference series* 1716.1, s. 12040–. DOI: 10.1088/1742-6596/1716/1/012040.
- Koiri, Mithilesh Kumar ja Anuj Kumar Sharma (2021). "Characterization and behavior study of nitinol shape memory alloy wire for effective and efficient use in soft robotics as an actuator". eng. *Indian journal of pure & applied physics* 59.3, s. 216–222. DOI: 10.56042/ijpap.v59i3.67755.
- Koivikko, Anastasia, Dirk-Michael Drotlef, Cem Balda Dayan, Veikko Sariola ja Metin Sitti (2021). "3D-Printed Pneumatically Controlled Soft Suction Cups for Gripping Fragile, Small, and Rough Objects". eng. *Advanced intelligent systems* 3.9. DOI: 10.1002/aisy.202100034.
- Kroupa, Tomas, Milan Dana ja Miroslav Zetek (2018). "Using of waterjet technology for cutting aluminum alloy". eng. *Annals of DAAAM & proceedings*, s. 0486–. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.068.
- Li, Tianxiang, Zhengren Shi, Xianru He, Ping Jiang, Xiaobin Lu, Rui Zhang ja Xin Wang (2018). "Aging-resistant functionalized LDH-SAS/nitrile-butadiene rubber composites:

- Preparation and study of aging kinetics/anti-aging mechanism”. eng. *Materials* 11.5. DOI: 10.3390/ma11050836.
- Liu, Shoufeng, Fujun Wang, Zhu Liu, Wei Zhang, Yanling Tian ja Dawei Zhang (2021). ”A Two-Finger Soft-Robotic Gripper With Enveloping and Pinching Grasping Modes”. eng. *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 26.1, s. 146–155. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3005782.
- Long, Christopher M., Marc A. Nascarella ja Peter A. Valberg (2013). ”Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions”. eng. *Environmental pollution (1987)* 181, s. 271–286. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.06.009.
- Lu, Zeyu, Haotian Guo, Wensi Zhang ja Haoyong Yu (2022). ”GTac-Gripper: A Reconfigurable Under-Actuated Four-Fingered Robotic Gripper With Tactile Sensing”. eng. *IEEE robotics and automation letters* 7.3, s. 7232–7239. DOI: 10.1109/LRA.2022.3181370.
- Lukka, Kari (19. toukokuuta 2014). *Konstruktiivinen tutkimusote*. Verkkosivu. Metodix. Saatavilla: <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/> (viitattu 07.02.2024).
- Maggi, Matteo, Giacomo Mantriota ja Giulio Reina (2022). ”Introducing POLYPUS: A novel adaptive vacuum gripper”. eng. *Mechanism and machine theory* 167, s. 104483–. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104483.
- Meng, Jiawei, Lucas Gerez, Jayden Chapman ja Minas Liarokapis (2020). ”A Tendon-Driven, Preloaded, Pneumatically Actuated, Soft Robotic Gripper with a Telescopic Palm”. eng. Teoksessa: *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*. Piscataway: IEEE, s. 476–481. DOI: 10.1109/RoboSoft48309.2020.9115986.
- Müller, Heinz K. ja Bernard S. Nau (1998). *Fluid Sealing Technology: Principles and Applications*. eng. 1. painos. Milton: CRC Press. ISBN: 0824799690.
- Nishimura, Toshihiro, Tsubasa Muryoe, Yoshitatsu Asama, Hiroki Ikeuchi, Ryo Toshima ja Tetsuyou Watanabe (2022). ”Single-Fingered Reconfigurable Robotic Gripper With a Folding Mechanism for Narrow Working Spaces”. eng. *IEEE robotics and automation letters* 7.4, s. 10192–10199. DOI: 10.1109/LRA.2022.3192653.
- Nissim, Nir, Ran Yahalom ja Yuval Elovici (2017). ”USB-based attacks”. eng. *Computers & security* 70, s. 675–688. DOI: 10.1016/j.cose.2017.08.002.
- Petterson, Anders, Thomas Ohlsson, Darwin G. Caldwell, Steven Davis, John O. Gray ja Tony J. Dodd (2010). ”A Bernoulli principle gripper for handling of planar and 3D (food) products”. eng. *Industrial robot* 37.6, s. 518–526. DOI: 10.1108/01439911011081669.
- Romeo, Rocco A., Luca Fiorio, Edwin J. Avila-Mireles, Ferdinando Cannella, Giorgio Metta ja Daniele Pucci (2019). ”Closed-loop Force Control of a Pneumatic Gripper Actuated by Two Pressure Regulators”. eng. Teoksessa: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, s. 7157–7162. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968226.

- Rosati, Giulio, Simone Minto ja Fabio Oscari (2017). "Design and construction of a variable-aperture gripper for flexible automated assembly". eng. *Robotics and computer-integrated manufacturing* 48, s. 157–166. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.03.010.
- Röthlisberger, Marc, Marcel Schuck, Laurenz Kulmer ja Johann W. Kolar (2021). "Contactless picking of objects using an acoustic gripper". eng. *Actuators* 10.4, s. 70–. DOI: 10.3390/act10040070.
- Saaranen-Kauppinen, Anneli ja Anna Puusniekka (2006). *6.3.3 Strukturoitu ja puolistrukturoitu haastattelu*. Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto. Menetelmäopetuksen tietovaranto - KvaliMOTV. Saatavilla: https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/kvali/L6_3_3.html (viitattu 08. 02. 2024).
- SCHUNK SE & Co. KG (2024). *PPD Pneumatic positioning device*. Verkkosivu. Saatavilla: https://schunk.com/fi/en/gripping-systems/accessories/ppd/c/PGR_7035 (viitattu 02. 04. 2024).
- Tapia, Endika, Leonardo Sastoque-Pinilla, Unai Lopez-Novoa, Iñigo Bediaga ja Norberto López de Lacalle (2023). "Assessing Industrial Communication Protocols to Bridge the Gap between Machine Tools and Software Monitoring". eng. *Sensors (Basel, Switzerland)* 23.12, s. 5694–. DOI: 10.3390/s23125694.
- Tichem, Marcel, Defeng Lang ja Bernhard Karpuschewski (2004). "A classification scheme for quantitative analysis of micro-grip principles". eng. *Assembly automation* 24.1, s. 88–93. DOI: 10.1108/01445150410698976.
- Tunncliffe, Lewis B. (2021). "Fatigue crack growth behavior of carbon black-reinforced natural rubber". eng. *Rubber chemistry and technology* 94.3, s. 494–514. DOI: 10.5254/rct.21.79935.
- Universal Robots (2022). *URCap Basics*. Verkkosivu. Saatavilla: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/urplus-resources/urcap-basics/> (viitattu 07. 04. 2025).
- UserLand Software (1999). *XML-RPC*. Verkkosivu. Saatavilla: <https://xmlrpc.com/> (viitattu 07. 04. 2025).
- Vail, J.R., B.A. Krick, K.R. Marchman ja W. Gregory Sawyer (2011). "Polytetrafluoroethylene (PTFE) fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites". eng. *Wear* 270.11, s. 737–741. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.003.
- Wang, Zhanwei, Seppe Terryn, Huijiang Wang, Julie Legrand, Ali Safaei, Joost Brancart, Guy Van Assche ja Bram Vanderborght (2023). "Self-Closing and Self-Healing Multi-Material Suction Cups for Energy-Efficient Vacuum Grippers". eng. *Advanced intelligent systems* 5.10. DOI: 10.1002/aisy.202300135.
- Wang, Zhongkui, Yui Makiyama ja Shinichi Hirai (2021). "A Soft Needle Gripper Capable of Grasping and Piercing for Handling Food Materials". eng. *Journal of robotics and mechatronics* 33.4, s. 935–943. DOI: 10.20965/jrm.2021.p0935.
- Zhakypov, Zhenishbek, Florian Heremans, Aude Billard ja Jamie Paik (2018). "An Origami-Inspired Reconfigurable Suction Gripper for Picking Objects With Variable Shape and

- Size". eng. *IEEE robotics and automation letters* 3.4, s. 2894–2901. DOI: 10.1109/LRA.2018.2847403.
- Zhang, Bin, Xiucheng Feng, Cheng Yang, Xiaoming Yu ja Jiawei Nie (2021). "Mechanical properties of aramid fiber reinforced rubber sealing gasket at different temperatures". eng. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 714.3. DOI: 10.1088/1755-1315/714/3/032079.
- Zhang, Hui, Jef Peeters, Eric Demeester ja Karel Kellens (2023). "Deep Learning Reactive Robotic Grasping With a Versatile Vacuum Gripper". eng. *IEEE transactions on robotics* 39.2, s. 1–16. DOI: 10.1109/TRO.2022.3226148.
- Zheng, H.Y., Z.Z. Han, Z.D. Chen, W.L. Chen ja S. Yeo (1996). "Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting". eng. *Journal of materials processing technology* 62.4, s. 294–298. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02423-5.
- Zheng, Xiaotao, Xiang Wen, Wei Wang, Jiuyang Gao, Wei Lin, Linwei Ma ja Jiuyang Yu (2017). "Creep-ratcheting behavior of PTFE gaskets under various temperatures". eng. *Polymer testing* 60, s. 229–235. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.04.005.

LIITE A: HAASTATTELUKYSYMYKSET

Yleinen ongelma ja leikkeet:

1. Minkälaista ongelmaa kehitettävällä tarttujalla ollaan yleisellä tasolla ratkaisemassa?
2. Minkälaisia valmistamanne leikkeet ovat, joita tarttujalla tulisi ensisijaisesti poimia?
3. Mitä materiaalia nämä leikkeet ovat, joihin tartunnassa keskitytään?
4. Kuinka jäykkiä, taipuisia tai kokoonpuristuvia nämä leikkeet ovat?
5. Minkä kokoisia ovat suurimmat ja pienimmät leikkeet, joita tarttujalla tulisi pystyä poimimaan?
6. Minkä muotoisia leikkeet ovat ja kuinka paljon muotovirhettä niissä voi olla (esim. mittojen muutokset tai taipuminen)?
7. Mitkä ovat tartunnan kannalta ohuimman ja paksuimman leikkeen ainevahvuudet?
8. Mitkä osat leikkeistä ovat herkimpiä vaurioille?

Tarttujan suunnitteluun liittyvät seikat:

9. Tulisiko tarttuja suunnitella siten, että myös mahdollisista herkistä kohdista voidaan suorittaa tartunta vai vältetäänkö näitä kohtia?
10. Missä leikkeet ovat ennen poimintaa (esim. paikka, orientaatio, ympärillä oleva tila, muut seikat)?
11. Onko jokin tartuntaperiaate vaadittu, toivottu, epätoivottu tai kielletty (esim. imukupit, reunasta puristaminen leuoilla, koukulla poimiminen, neulat)?
12. Tavoitellaanko yhdellä teknologialla toimivaa tarttujaa vai useampaa teknologiaa yhdessä tarttujassa (esim. imukupit sekä leuoilla tarttumisen samassa tarttujassa)?
13. Minkälainen joustavuus tai uudelleenkonfiguroitavuus tarttujalle toivotaan (esim. tarttujan suunnittelu joidenkin minimi- ja maksimikokojen välillä oleville leikkeille yleisesti, nopeasti vaihdettava tartuntapää eri leikkeitä varten, tai suunnittelu optimoidusti yksittäiselle tuotteelle)?
14. Mihin asentoon leikkeitä tulisi pystyä asettamaan tartunnan lopuksi (esim. leikkeitä tulisi pystyä pinoamaan siististi, asettamaan liukuhihnalle satunnaiseen asentoon tai tiputtamaan laatikkoon)?

15. Minkälaisessa fyysisessä ympäristössä tarttujaa tullaan käyttämään (esim. puh-
taus, lämpötila, kosteus)?
16. Tuleeko tarttujan olla yhteensopiva jonkin olemassa olevan kiinnitysjärjestelmän
tai liitännän kanssa (esim. mekaaninen liitäntä robottiin, paineilma/alipaineliitännät,
mahdolliset anturit)?
17. Paljonko yhden leikkeen käsittelyyn on aikaa?
18. Onko tarttujan toimintaympäristöön tulossa tulevaisuudessa muutoksia, joita tulisi
ottaa huomioon suunnittelussa?
19. Minkälaisia ympäristön tai muun asian aiheuttamia rajoitteita tulisi ottaa huomioon
(esim. tarttujalle sallittu liiketila, muut rajoitteet)?
20. Tuleeko muita toiveita tai rajoitteita mieleen tarttujaan liittyen?